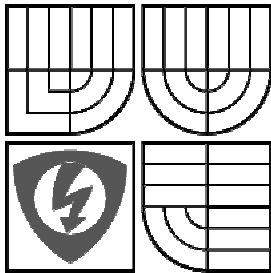


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING  
AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

# METODIKA ZABEZPEČOVÁNÍ OPTIMÁLNÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ V SOULADU S METROLOGICKOU KONFIRMACÍ

THE OPTIMAL ACCURACY OF MEASUREMENT ASSURANCE IN ACCORDANCE WITH  
METROLOGICAL CONFIRMATION

DISERTAČNÍ PRÁCE  
Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. PETR FRANK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Prof. Ing. KAREL HRUŠKA, DrSc.

BRNO 2009



**LICENČNÍ SMLOUVA  
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO**

uzavřená mezi smluvními stranami:

**1. Pan**

Jméno a příjmení: *Petr Frank*  
Bytem: *Olbrachtovo nám. 8/800, 624 00 Brno*  
Narozen: *13. 5. 1979 v Kadani*  
(dále jen „autor“)

a

**2. Vysoké učení technické v Brně**

Fakulta .....*elektrotechniky a komunikačních technologií*.....  
se sídlem ....*Údolní 244/53, 602 00 Brno*.....  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
.....  
(dále jen „nabyvatel“)

**Článek. 1**

**Specifikace školního díla**

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: *Metodika zabezpečování optimální přesnosti měření v souladu s metrologickou konfirmací*

Vedoucí/ školitel VŠKP: *Prof. Ing. Karel Hruška, DrSc.*

Ústav: *Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky*

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů .....
- elektronické formě – počet exemplářů .....

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že dílo je dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užit, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Abstrakt**

Práce se zabývá problematikou vyjadřování a zabezpečování přesnosti měření. Toto téma zahrnuje komplexní analýzu procesu vyjadřování nejistoty měření, návrhu kalibračních intervalů a tvorbu konfirmačního systému. Základ práce spočívá v identifikaci možných problémů, které mohou při vyjadřování a zajišťování přesnosti měření nastat. Na analýzu navazují návrhy na řešení problematických bodů. Konkrétně se jedná o volbu rozložení pravděpodobnosti nejistoty typu A, určení stupňů volnosti nejistoty typu B, reflektování nelineární korelace vstupních veličin, volbu koeficientu krytí, volbu metody pro návrh kalibračních intervalů a postup při naplňování požadavků metrologické konfirmace. Součástí práce je vyjádření nejistoty měření při zkoušení přepětových ochran, na kterém se prakticky demonstrují závěry učiněné v syntetické části disertační práce.

## **Abstract**

This thesis deals with the evaluation of accuracy of measurement and achieving the required accuracy level. This includes global analysis of the uncertainty evaluation, the calibration interval design and the creation of confirmation system. Basis of this work is in identification of all possible problems, which may occur during evaluation of accuracy and achieving the required accuracy level. The analysis is followed by suggested solutions for identified problems. It means namely the selection of probability distribution in case of uncertainty type A, evaluation of degrees of freedom in case of uncertainty type B, nonlinear correlation of input values, evaluation of coverage factor, the choice of method for calibration interval design and the procedure for meeting all metrological confirmation requirements. The last part of the thesis is practical measurement and result evaluation in the field of surge protection devices. This chapter demonstrates conclusions from the syntactical part.

## **Klíčová slova**

Castrupova metoda, elektromagnetická kompatibilita, chyba měření, Ishikawův diagram, jakost, kalibrace, kalibrační intervaly, kombinovaná nejistota měření, konfirmační systém, konvečně pravá hodnota, měření, metrologická konfirmace, metrologické požadavky, návaznost, nejistota měření, ověření, posuzování shody, pravá hodnota, pravděpodobná chyba měření, přepětí, přepět'ové ochrany, přesnost měření, rozšířená nejistota měření, sdílené riziko, spolehlivost měření, standardizace, Weibullovo rozložení pravděpodobnosti, Welch-Satterthwaitův vztah.

## **Keywords**

In Czech equivalent order:

Castrup method, electromagnetic compatibility, error of the measurement, Ishikawa diagram, quality, calibration, calibration intervals, combined uncertainty of measurement, confirmation system, conventional true value, measurement, metrological confirmation, metrological requirements, traceability, uncertainty of measurement, verification, conformity, true value, probable error of measurement, voltage surge, surge protection devices, accuracy of measurement, expanded uncertainty of measurement, shared risk, reliability, standardization, Weibull probability distribution, Welch-Satterthwaite formula.

In alphabetic order:

Accuracy of measurement, calibration, calibration intervals, Castrup method, combined uncertainty of measurement, confirmation system, conformity, conventional true value, electromagnetic compatibility, error of the measurement, expanded uncertainty of measurement, Ishikawa diagram, measurement, metrological confirmation, metrological requirements, probable error of measurement, quality, reliability, shared risk, standardization, surge protection devices, traceability, true value, uncertainty of measurement, verification, voltage surge, Weibull probability distribution, Welch-Satterthwaite formula.

Bibliografická citace díla:

FRANK, Petr. *Metodika zabezpečování optimální přesnosti měření v souladu s metrologickou konfirmací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2009. 163 s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Karel Hruška, DrSc.

*Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně s využitím uvedených pramenů a literatury.*

.....

Podpis autora práce

Na tomto místě bych rád poděkoval lidem, kteří umožnili vznik této práce.

V první řadě děkuji školiteli **Prof. Ing. Karlu Hruškovi, DrSc.** za cenné odborné rady a připomínky. Vážím si obrovského dílu pracovního i soukromého času, který věnoval této disertační práci v průběhu jejího utváření. Taktéž jsem vděčný za velice vstřícný osobní přístup.

Dále děkuji **Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky** a jeho zaměstnancům za poskytnuté zázemí a všestrannou podporu.

Mé díky patří také společnosti **HAKEL, spol. s r.o.**, za možnost realizovat praktickou část disertační práce ve výrobním podniku, který exportuje výrobky do více než 30 zemí. Zejména děkuji řediteli této společnosti **Ing. Jaroslavu Hudcovi, Ph.D.** za umožnění spolupráce a velice vstřícný postoj, dále pak vedoucímu vývojového oddělení **Ing. Jiřímu Reisingerovi** za jeho čas, který věnoval mému seznamování s přístrojovým vybavením zkušební laboratoře a také za jeho ochotu, se kterou odpovídal na mé četné dotazy v průběhu plánování praktického měření. Za pomoc při samotném měření a za konzultace při zpracovávání hodnot děkuji **Lud'ku Hloucalovi**, pracovníkovi vývojového oddělení.

V neposlední řadě děkuji **Prof. RNDr. Josefu Tošenovskému, CSc.** z VŠB–TU Ostrava za cennou konzultaci v oblasti statistického zpracování dat při vyčíslování nejistoty měření a **doc. RNDr. Josefu Zapletalovi CSc.** za přínosnou konzultaci z oblasti statistických testů při praktickém vyhodnocování dat a za podnětné připomínky k syntetické části disertační práce.

Poslední dík patří mým blízkým. Především mé partnerce **Mgr. Michale Barnové** za trpělivost a pomoc při závěrečných korekturách práce a samozřejmě také mým rodičům za morální a materiální podporu v postgraduálním studiu.



## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
1.1	<b>Vyjadřování přesnosti výsledku měření</b> .....	<b>13</b>
1.2	<b>Zabezpečování výsledku měření</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>SOUČASNÉ POSTUPY ZABEZPEČOVÁNÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ</b> .....	<b>16</b>
2.1	<b>Nejistota měření</b> .....	<b>17</b>
2.1.1	Definice .....	17
2.1.2	Nejistota a posuzování shody .....	18
2.1.3	Zdroje nejistoty měření .....	21
2.1.4	Nejistota typu A .....	23
2.1.5	Nejistota typu B.....	24
2.1.6	Kombinovaná nejistota.....	28
2.1.6.1	Nekorelované vstupní veličiny .....	28
2.1.6.2	Korelované vstupní veličiny .....	30
2.1.7	Rozšířená nejistota .....	31
2.1.8	Zapisování výsledku za pomoci nejistoty měření .....	33
2.1.9	Shrnutí problémů při vyjadřování nejistoty měření .....	36
2.2	<b>Kalibrační intervaly</b> .....	<b>38</b>
2.2.1	Požadavky na kalibraci .....	39
2.2.1.1	Technické požadavky na kalibrační měření .....	39
2.2.1.2	Legislativní a normativní požadavky na kalibrační měření .....	40
2.2.2	Určování kalibračního intervalu.....	42
2.2.2.1	Určování kalibračních intervalů – jako proces.....	45
2.2.3	Metody určování kalibračních intervalů .....	46
2.2.3.1	Castrupova metoda určování délky kalibračních intervalů.....	48
2.2.3.2	Určování kalibračních intervalů za pomoci Weibullova rozložení pravděpodobnosti .....	49
2.2.4	Shrnutí výhod a nevýhod představených přístupů .....	55
2.3	<b>Konfirmační systém</b> .....	<b>56</b>
2.3.1	Odpovědnost managementu .....	58
2.3.1.1	Zaměření na zákazníka.....	59
2.3.1.2	Cíle jakosti .....	59
2.3.1.3	Přezkoumávání systému managementu .....	60
2.3.2	Řízení zdrojů .....	60
2.3.2.1	Lidské zdroje .....	60
2.3.2.2	Informační zdroje .....	61
2.3.2.3	Materiální zdroje .....	62
2.3.3	Metrologická konfirmace .....	62
2.3.3.1	Intervaly mezi metrologickou konfirmací.....	66
2.3.4	Proces měření.....	69
2.3.5	Nejistota měření a návaznost .....	70
2.3.6	Tvorba konfirmačního systému.....	70

<b>3</b>	<b>ŘEŠENÍ PROBLÉMŮ VZNIKAJÍCÍCH PŘI ZABEZPEČOVÁNÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ.....</b>	<b>72</b>
<b>3.1</b>	<b>Nejistota měření .....</b>	<b>72</b>
3.1.1	Postup vyjadřování nejistoty měření.....	72
3.1.2	Určování a popis zdrojů nejistoty .....	74
3.1.2.1	Konstrukce diagramu příčin a následků pro zdroje nejistoty měření .....	74
3.1.2.2	Praktický návod pro identifikaci zdrojů nejistot.....	77
3.1.2.3	Systematizování zdrojů nejistot .....	79
3.1.3	Výpočet nejistoty typu A .....	80
3.1.3.1	Testy rozložení pravděpodobnosti .....	87
3.1.3.2	Speciální test pro malé rozsahy výběru – kritérium W .....	87
3.1.4	Výpočet nejistoty typu B .....	90
3.1.5	Kombinovaná nejistota .....	93
3.1.5.1	Nejistota v případě nelineární korelace vstupních veličin .....	96
3.1.6	Rozšířená nejistota .....	98
3.1.6.1	Výpočet stupňů volnosti nejistoty typu B.....	98
3.1.6.2	Stanovení koeficientu krytí.....	99
<b>3.2</b>	<b>Kalibrační intervaly.....</b>	<b>106</b>
3.2.1	Porovnání vybraných metod.....	106
3.2.1.1	Optimalizace nákladů na kalibrace.....	107
3.2.2	Volba kalibračních intervalů – shrnutí.....	109
<b>4</b>	<b>PRAKTICKÁ APLIKACE: ZKOUŠENÍ PŘEPĚŤOVÝCH OCHRAN PROUDOVÝM IMPULSEM 8/20.....</b>	<b>111</b>
<b>4.1</b>	<b>Úvod do problematiky zajišťování kvality elektrické energie.....</b>	<b>111</b>
4.1.1	Elektromagnetická kompatibilita .....	112
4.1.2	Přepětí v elektrické síti a ochrana proti němu.....	114
<b>4.2</b>	<b>Zkoušení přepět'ových ochran.....</b>	<b>116</b>
<b>4.3</b>	<b>Přepět'ová ochrana PK 2.....</b>	<b>117</b>
4.3.1	Metodika měření a měřicí postup .....	120
4.3.2	Analýza zdrojů nejistot .....	123
4.3.3	Výpočet nejistoty .....	126
4.3.3.1	Nejistota měření při kontrole parametrů generátoru.....	126
4.3.3.2	Nejistota měření zkoušení přepět'ové ochrany .....	130
4.3.4	Naměřená data a výsledky .....	130
<b>4.4</b>	<b>Zhodnocení výsledků a doporučení dalšího vývoje měření přepět'ových ochran.....</b>	<b>132</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>134</b>
6	Seznam použité literatury .....	137
7	Seznam použitých zkratk .....	144
8	Seznam použitých symbolů a znaků.....	146
9	Seznam příloh .....	148
<b>10</b>	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>149</b>
A.	Fotografie měřicího pracoviště .....	149
B.	Generátor bleskových proudů .....	150
C.	Prohlášení o shodě přepět'ové ochrany PK2 .....	151
D.	Systém detekce blesků nad ČR a Evropou.....	152
E.	Výtah z naměřených hodnot.....	153

F.	Využití softwaru při vyjadřování výsledku měření přepětových ochran.....	157
G.	Elektronická příloha .....	158
H.	Odborný životopis .....	159
I.	Curriculum Vitae .....	162

## 1 ÚVOD

V současné době se průmyslová výroba potýká s požadavky na stále vyšší kvalitu. U posuzované produkce je potřeba transparentním a kvalifikovaným způsobem určit skupinu sledovaných parametrů výrobků, které se budou sledovat a řídit. Vzhledem k velkým nárokům na výslednou jakost začíná být problémem zajištění dostatečně přesného a objektivního měření vybraných parametrů. Jedná se o oblast, ve které se stále hledají nové metodiky nejenom pro měření, ale také pro vyjadřování výsledku tohoto měření. Právě vyjadřováním a zabezpečováním se zabývá tato disertační práce, která je primárně zaměřená na elektrotechnickou výrobu, ale její závěry se dají analogicky aplikovat i na jiná průmyslová odvětví.

Kvantitativní posuzování parametrů objektů, které člověka obklopují, bylo vždy neodmyslitelnou součástí jakékoliv výroby, výzkumu nebo také obchodu. V současné době nabývá však velice rychle na významu přesnost a spolehlivost s jakou jsme schopni měřit. Moderní průmyslová výroba a vědecký výzkum se totiž již bez kvalitních výsledků elektrotechnických měření neobejdou. Naměřené hodnoty slouží k další syntéze nebo k posuzování shody v kritických aplikacích. V obou těchto případech může nesprávně vyjádřená přesnost měření implikovat nesprávné závěry. Zaručená správnost měření a validita jeho výsledků je neodmyslitelná i v případě zajišťování bezpečnosti lidí a majetku.

V minulosti sloužila k posouzení přesnosti měření tzv. *chyba měření*, která udává odchylku naměřené hodnoty od hodnoty konvečně pravé. Problémem však byla nejednotnost metodiky jejího výpočtu, a z toho plynoucí nejednoznačnost a špatná přenositelnost výsledků měření. V současné době nahrazuje chybu měření nový parametr vyjadřující přesnost a spolehlivost, a to tzv. *nejistota měření*. Cílem nejistoty je vyjádřit interval okolo naměřené hodnoty tak, aby v něm byla skutečná hodnota měřené veličiny obsažena s požadovanou pravděpodobností.

Při výpočtu nejistoty měření však vzniká celá řada problémů, protože v konkrétních případech je obtížné naplnit její obecnou definici. Problémy mohou vzniknout ve všech fázích postupu vyjadřování nejistoty měření. Není například zcela jasné, jakým způsobem zahrnout silné nelineární korelace vstupních veličin, jak stanovit stupně volnosti u informací získaných z vnějších zdrojů nebo jak volit rozdělení pravděpodobnosti. Právě analýza a vyřešení problémů vznikajících při vyjadřování nejistoty měření je prvním cílem této disertační práce.

Z hlediska zabezpečování výsledku měření je nejistota měření pouze jedním ze základních faktorů, důraz je ale kladen také na mnoho dalších činitelů. K zajištění kvality měření jako takového slouží tzv. *metrologická confirmace*. Metrologická confirmace je definována jako soubor činností požadovaných k zajištění takového stavu měřidla, aby vyhovovalo zamýšlenému používání. Stejně jako u vyjadřování nejistoty měření však vzniká problém s naplněním obecných požadavků v konkrétních případech. Proto je dalším cílem této práce analýza požadavků na metrologickou confirmaci a návrh postupu jejího zavedení do laboratoře.

Důležitou součástí konfirmačního systému je volba kalibračních intervalů měřicího vybavení, která je zároveň jedním z hlavních nástrojů zajišťování požadované přesnosti měření. Problematika volby délky kalibračního intervalu úzce souvisí s nejistotou měření, které zde slouží jako požadavek na přesnost a zároveň je nedílnou součástí protokolu o kalibraci. Existuje několik metod, jak kalibrační interval navrhnout. Tato disertační práce si klade za cíl porovnat v současnosti používané metody, zanalyzovat jejich nedostatky a následně zvážit možnosti jejich použití. Součástí řešení je také vypracování postupu pro

výběr vhodné metody tak, aby byla uvažována nejistota měření a splněny všechny požadavky kladené metrologickou konfirmací.

V současné době je při zajišťování přesnosti a spolehlivosti výsledků měření problémem nedostatek konkrétních návodů, které by obecné požadavky metrologické konfirmace uváděly do praxe. Částečně to vyplývá z komplexnosti problematiky, kvůli které není ani z principu možné předem detailně vypracovat obecné postupy pro všechny druhy měření. Proto by měl být pro každé měření zpracován na míru nový postup metrologické konfirmace tak, aby vyhovoval definovaným požadavkům. To vyžaduje hluboké znalosti metrologie, statistiky, počtu pravděpodobnosti a hlavně znalost daného měřicího systému a měřicí metody. V praxi se bohužel začalo uplatňovat přejímání postupů z jiných aplikací a zjednodušujících návodů. Zjednodušené postupy jsou použitelné pouze za určitých podmínek, a proto jejich používání není ve všech případech vhodné. Tato disertační práce si proto klade mimo jiné za cíl zjistit, za jakých podmínek lze konkrétní zjednodušení používat.

Řada laboratoří a podniků řeší dilema zavedení systému metrologické konfirmace pomocí outsourcingu či aplikace specializovaného softwaru. To však není vždy zárukou správného naplnění normativních a legislativních požadavků. Pokaždé je třeba provést analýzu všech předpokladů, a na základě ní navrhnout postup metrologické konfirmace, potažmo délku kalibračních intervalů a způsob vyjadřování nejistoty měření. Z tohoto důvodu je cílem této disertační práce rozbor všech faktorů, které mohou mít na implementaci konfirmačního systému vliv. Na základě tohoto rozboru, kterým identifikuje kritická místa, jsou pak doporučeny vhodné postupy zavedení a udržování konfirmačního systému.

Přínosem disertační práce je tedy vyřešení některých problémů, které mohou vzniknout při zabezpečování přesnosti výsledku měření, a to v celé šíři této oblasti, od vyjadřování nejistoty měření, přes návrh kalibračních intervalů, až po naplnění požadavků metrologické konfirmace. Součástí disertace je i praktická aplikace teoretických závěrů ve zkušební laboratoři výrobního podniku HAKEL spol. s r. o.

## **1.1 Vyjadřování přesnosti výsledku měření**

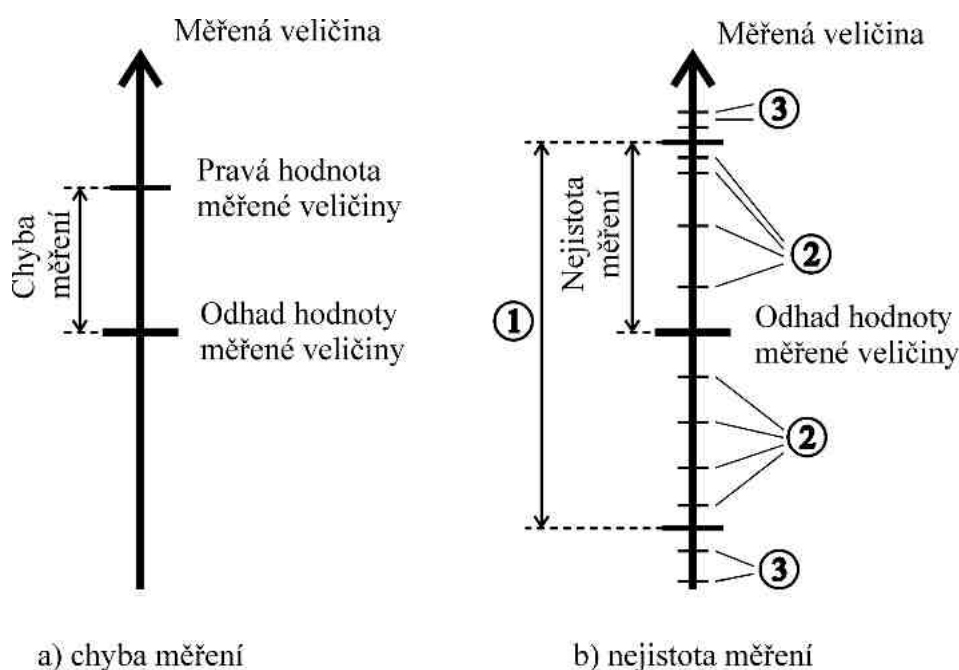
Hodnotu kvantitativně popsáního parametru jakéhokoliv objektu zjistíme jedině měřením. *Měření* samotné je definováno jako soubor činností, jejichž cílem je stanovit hodnotu měřené veličiny [2, §2.1]\*. Naneštěstí není možné zjistit tuto hodnotu s absolutní přesností, protože tato tzv. *pravá hodnota*, která je ve shodě s definicí dané veličiny, je obecně neurčitelná. Proto platí, že výsledek měření jako hodnota získaná měřením a přisouzená měřené veličině, se vždy od pravé hodnoty liší. Z tohoto důvodu se vyjadřuje tzv. *přesnost měření*, tedy těsnost shody mezi výsledkem měření a pravou hodnotou měřené veličiny. Přesnost či nepřesnost jsou kvalitativní pojmy a pro technickou praxi či posuzování shody je třeba je nějak kvantitativně popsat. Toho lze dosáhnout přiřazením takového parametru výsledku měření, který míru přesnosti vyjadřuje. Tímto parametrem je tradičně chyba měření, která je definována jako výsledek měření mínus pravá hodnota měřené veličiny. Vzhledem k neurčitosti pravé hodnoty je ve své podstatě neurčitelná

---

\* V úvodních kapitolách disertační práce jsou uvedeny některé základní definice, které jsou pro jednoznačný výklad následujícího textu nezbytné.

i chyba měření. Tento nedostatek se řešil zavedením termínu *konvenčně pravá hodnota*, přičemž konvenčně pravou hodnotou se myslí hodnota, která je přisuzována blíže určené veličině a přijatá, někdy konvencí, jako hodnota, jejíž přesnost je vyhovující pro daný účel [2, §1.20]. Vzhledem k této hodnotě se poté vztahuje i chyba měření. Nevýhoda chyby měření spočívá kromě zmíněného faktu neurčitelnosti i v nejednotné metodice jejího stanovování. Výsledky měření, u kterých se přesnost vyjadřuje pomocí chyby, jsou proto špatně přenositelné, klesá možnost jejich využití a nejsou vhodné k porovnávání. Další nevýhodou je, že nevíme, na kolik se můžeme na uvedenou chybu měření spolehnout. Je sice zaveden pojem *pravděpodobné chyby měření*, ale ten je spjat převážně s náhodnou složkou celkové chyby. Proto se v současné době pro vyjádření přesnosti měření používá namísto chyby nejistota měření. Termínem nejistota měření, jehož smysl byl již popsán v předchozím textu, se myslí parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině [2, §3.9].

Následující obrázek zobrazuje definici chyby a nejistoty měření.



- ① Interval, ve kterém leží pravá hodnota měřené veličiny s určitou pravděpodobností (např. 95 %)
- ② Hodnoty, které mohou reprezentovat pravou hodnotu měřené veličiny na určité hladině confidence (např. 95 % pro celý uzavřený interval omezený nejistotou měření)
- ③ Hodnoty, které mohou reprezentovat pravou hodnotu měřené veličiny na určité hladině confidence (např. 5 % pro celý otevřený interval vně intervalu definovaném nejistotou měření)

Obr. 1: Porovnání významu chyby a nejistoty měření

Odlišnost nejistoty měření a chyby měření tedy spočívá v tom, že chyba je *rozdíl* naměřené a pravé hodnoty a nejistota je *interval*, ve kterém leží pravá hodnota s určitou pravděpodobností. V této práci se termín „pravá hodnota měřené veličiny“ nebude již dále vyskytovat, protože v souvislosti s nejistotou měření již není nutné „pravou“ hodnotu

zvláště definovat a postačí termín „hodnota měřené veličiny“. Tento přístup lze pozorovat i u dalších autorů, např. [3, s. 14]. Podrobnosti výpočtu nejistoty měření a související problémy jsou popsány dále v kapitole 2.1, ale na tomto místě je ještě nutno zmínit další důvod pro užívání nejistoty měření k vyjádření přesnosti výsledku měření. Tímto důvodem je jednoznačnost, která je zaručena základními dokumenty týkajícími se vyjadřování nejistoty měření, a to zejména mezinárodní dokumenty [4] a [6].

Přestože tyto dokumenty garantují jednoznačný význam a jednotnou metodiku pro stanovování nejistoty měření, tak se výhoda jednoznačnosti v praxi často ztrácí. Důvodem je špatná interpretace či nenaplnění požadavků, které tyto dokumenty kladou. V této oblasti je třeba ještě mnoha výzkumů a analýz, aby se veškeré postupy a pojmy ujasnily a jednoznačnost byla opravdu zabezpečena. K tomu by ostatně měla přispět i tato disertační práce.

Nicméně přes všechny problémy se nejistota měření široce užívá jako jednoznačný parametr výsledku měření, a to ve standardizaci i v legislativě. Některé české technické normy vyjadřování nejistoty přímo vyžadují (např. [7]) a z legislativního hlediska je povinné vyjadřovat nejistotu měření všude tam, kde to ukládá zákon (např. [8]). Po vstupu ČR do Evropské unie přejímáme v rámci harmonizace některé směrnice, které také užívání nejistoty přímo vyžadují (např. [9]).

Zdrojem, na který se nejčastěji odkazují zákony i standardy ČR je ISO 10012 [10]. Dokument se zabývá zabezpečováním výsledku měření jako takového, tedy celým procesem měření. Tuto širokou problematiku přibližuje následující kapitola 1.2. Krom toho se [10] odkazuje na ISO 17025 [11], čímž je zaručena požadovaná jednoznačnost definice i postupu vyjadřování nejistoty měření. Celý obsah [11] je samozřejmě v souladu s dokumentem GUM [4], který je hojně odkazován a citován.

Definiční základna je tedy vytvořena, ale přesto je třeba vyřešit spory, jak některé požadavky na vyjadřování nejistoty interpretovat a plnit. Rozborem jednotlivých kroků výpočtu nejistoty měření se zabývá kapitola 2.1 a v kapitole 3.1 jsou popsána řešení jednotlivých problémů, které mohou vzniknout, a také často vznikají.

## **1.2 Zabezpečování výsledku měření**

Pojem zabezpečování výsledku měření v sobě zahrnuje nejenom zabezpečování určité úrovně přesnosti, například pomocí správně volených kalibračních intervalů, ale také širší problematiku zabezpečování správnosti měření jako takového. Předmětem zájmu není tedy jenom vyjadřování přesnosti, ale také měřicí přístroje, obsluhující personál, dokumentace, atd.

Pro zabezpečení a řízení všech faktorů, které mají vliv na správnost výsledku měření, slouží tzv. *konfirmační systém*, jehož obsahem je již výše zmíněná metrologická konfirmace. V podstatě jde o to, aby všechny prvky měřicího systému splňovaly tzv. *metrologické požadavky*. Uvedené vyjadřování nejistoty měření a nastavování kalibračních intervalů jsou podstatné, avšak ne jediné součásti konfirmačního systému. Tento systém zahrnuje měřicí proces od návrhu, po realizaci, a zaměřuje se i na jeho záznamy, vyhodnocování a návaznost. Dle [10] jsou dalšími prvky, na něž je kladen důraz, odborná způsobilost personálu, software, záznamy, identifikace měřicího vybavení, měřicí vybavení samotné, prostředí, externě dodávané služby a výrobky.

Před dalším výkladem je třeba definovat používané termíny *kalibrace*, *návaznost* a *ověření*. Návazností se myslí vlastnost výsledku měření nebo hodnoty etalonu, kterou může být určen vztah k uvedeným referencím, zpravidla státním nebo mezinárodním

etalonům, přes nepřerušovaný řetězec porovnání (řetězec návaznosti), jejichž nejistoty jsou uvedeny [2, §6.10]. Kalibrace reprezentuje soubor úkonů, kterými se stanoví za specifikovaných podmínek vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem nebo měřicím systémem nebo hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony [2, §6.11]. Výsledek kalibrace dovoluje buďto přiřazení hodnot měřené veličiny k indikacím nebo stanovení korekcí ve vztahu k indikacím. Kalibrace je tedy, zjednodušeně řečeno, porovnáním s referenčním materiálem, či etalonem. Ověřením naproti tomu rozumíme soubor úkonů, kterými se stanoví za specifikovaných podmínek, zda měřicí přístroj splňuje zákonné požadavky (Tato definice ověření není součástí [2], ale v další verzi tohoto dokumentu by se již měla objevit ve smyslu přejatém z [12, §3.8.4], viz [13]).

Řešená problematika zabezpečování výsledku měření je v disertační práci dělena na dvě části. Tu první tvoří zabezpečování přesnosti měření pomocí kalibračních intervalů, které bude podrobněji rozebráno v kapitole 2.2 a druhou částí je zabezpečování ostatních požadavků na proces měření a měřicí vybavení, tedy zabezpečování plnění metrologických požadavků. Tato část zahrnující i problematiku budování konfirmačního systému je rozvedena v kapitole 2.3.

Zabezpečování výsledku měření je významnou oblastí, a to i v mezinárodním měřítku, protože bez přenositelného výsledku měření není možná technická spolupráce, ani mezinárodní obchod. Právě proto i všechny požadavky na konfirmační systém vycházejí z mezinárodní spolupráce a jsou součástí mezinárodních dohod. Nejvýznamnějšími reprezentanty mezinárodně formulovaných požadavků jsou již zmiňované dokumenty VIM [2], GUM [4], ISO/IEC 17025 [6] a ISO 10012 [14]. Česká republika je prostřednictvím národního orgánu pro akreditaci, tedy Českého institutu pro akreditaci (ČIA), členem Mezinárodního sdružení pro akreditaci (ILAC) a proto jsou pro nás směrodatné i dokumenty této organizace. Toto členství je zárukou stejných přístupů všech členů k procesu měření v akreditovaných laboratořích a umožňuje plnou mezinárodní kompatibilitu výsledků. V souvislosti s naším členstvím v Evropské unii, je třeba se na problematiku měření podívat i z evropského pohledu. ČR je členem jak Evropské organizace pro akreditaci (EA), tak také Evropské normalizace (CEN/CENELEC), což znamená, že jsme taktéž zavázáni plnit požadavky dokumentů vydávaných těmito organizacemi.

Jak přesně požadavky těchto dokumentů chápat a hlavně naplňovat, to je v současné době palčivá otázka, jejíž vyřešení je pro národní i mezinárodní vědeckou spolupráci, obchod a legislativní regulaci nezbytné. K vyřešení problému nejednoznačnosti výsledků měření a problému zavádění konfirmačního systému by měly přispět i výsledky této disertační práce.

## **2 SOUČASNÉ POSTUPY ZABEZPEČOVÁNÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ**

Současný stav v metrologii a standardizaci lze označit jako čas zavádění nových postupů. Jsou zde cíle – požadavky, a začínají se objevovat cesty – návody, jak těchto požadavků dosáhnout. Je zde však ještě celá řada pochybností, jak o cestách naplnění požadavků, tak o požadavcích samotných. Je ještě třeba zpracovat celou řadu problémů, a to na teoretické i praktické úrovni.

V následujících třech podkapitolách jsou shrnuty současné postupy užívané v jednotlivých oblastech zabezpečování výsledku měření, tedy postupy pro vyjadřování nejistot měření, stanovování kalibračních intervalů a zavádění metrologické konfirmace.



Při zpracovávání současných postupů je čerpáno zejména z [4], [3], [15] a [25], ale i z dalších dostupných publikací, které jsou na příslušných místech odkazovány. Nové informace a metodiky jsou velmi těžko dostupné, neboť se jedná o know-how, po kterém je velká poptávka a proto je nabízeno převážně komerčně. Text byl tvořen s úmyslem podat ucelený přehled nejnovějších postupů, se zaměřením na analýzu jejich nedostatků. Tato analýza posloužila jako podklad pro řešení navrhovaná v kapitole 3.

## 2.1 Nejistota měření

Definice nejistoty měření jako technického termínu a postup pro její vyjadřování vychází z dokumentu Mezinárodní organizace pro standardizaci „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ [15] z roku 1993. V současné době je platná novější verze z roku 1995 [4], ve které jsou opraveny některé chyby staršího vydání. Tento dokument vznikl delší dobu jako reakce na požadavek pracovní skupiny BIMP a byl výsledkem práce jak BIMP, tak expertů z IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP a OIML (význam všech zkratk je uveden v kap. 7). Již zmiňovaným přínosem tohoto dokumentu je zejména sjednocení metodiky vyjadřování nejistoty měření. Přes velmi pečlivé zpracování vyvstalo při zpracovávání nové problematiky několik sporných pasáží. Dokumentu je na jedné straně vytýkána malá teoretická rozpracovanost, a na straně druhé inženýři namítají, že i v aktuální podobě je „Guide“ nebo „GUM“, jak bývá [4] často nazýván, špatně aplikovatelný do praxe, a to právě pro svou obecnost. Příkladem takové kritiky je např. [18]. Některé hlasy, jako např. [19] dokonce napadají celý koncept nejistoty měření jako takové. Následující výklad a analýza vyjadřování nejistoty měření vychází právě z dokumentu GUM a většina problémů, které budou rozváděny, mají příčinu právě v neúplnosti, či na druhé straně komplikovanosti tohoto dokumentu. Přes tyto výhrady zůstává faktem, že standardizace výpočtu nejistoty měření přispěla k celosvětově jednotnému způsobu vyjadřování přesnosti měření, a tím i ke kompatibilitě mezi státy a obory.

Bohužel bývá běžné, že mezinárodní normy nejsou dostupné zdarma a tím se komplikuje jejich šíření a další vývoj. Výbornou zprávou pro mezinárodní standardizaci nejistoty měření je založení organizace JCGM, která si mimo jiné klade za cíl udržovat dokument „GUM“ a snažit se podpořit jeho užívání. Tato organizace se zasloužila o volnou dostupnost dokumentu – od září 2008 je „GUM“ dostupný spolu s aktuálními opravami na webových stránkách BIMP/JCGM [5].

Současný stav si přesto žádá další vývoj, protože jakékoliv nejasnosti a chybné interpretace mohou roli nejistoty jako jednoznačného parametru výsledku měření zpochybnit. Nacházíme se teprve v počáteční fázi, kde je naznačen obecný směr, nikoliv však všechny konkrétní technologie postupů. Ty musí teprve vypracovat a potvrdit praxe. Následující text rozebírá vyjadřování nejistoty měření krok po kroku a analyzuje možnosti vzniku nejednoznačnosti v použité metodice.

### 2.1.1 Definice

Nejistota měření je definována jako parametr spojený s výsledkem zkoušky, který charakterizuje rozptyl hodnot, o němž se s určitou pravděpodobností tvrdí, že v něm leží správná hodnota. ([20] dle [2, §3.9]). Tímto parametrem může být např. *standardní odchylka* nebo *šířka konfidenčního intervalu*. Nejistota měření sestává z mnoha složek. Některé tyto složky je možné odhadnout na základě statistického rozboru výsledků řady měření a lze je charakterizovat směrodatnými odchylkami. Odhady některých složek lze provést pouze na základě zkušeností či dalších informací.

Takto vymezená nejistota měření je technickým termínem a nesmí být zaměňována s obecným pojmem pochybnosti. Tím, že nejistotu měření vyjádříme, získáváme údaj o přesnosti měření, na který se můžeme s určitou pravděpodobností spolehnout. Zjišťujeme tedy, nakolik je výsledek měření věrohodný. Je to zdánlivě paradoxní zjištění, ale bez vyjádřené nejistoty měření je výsledek měření velice nejistý.

Přístup dokumentu GUM [4] k vyjadřování nejistoty měření je založen na těchto základních pravidlech:

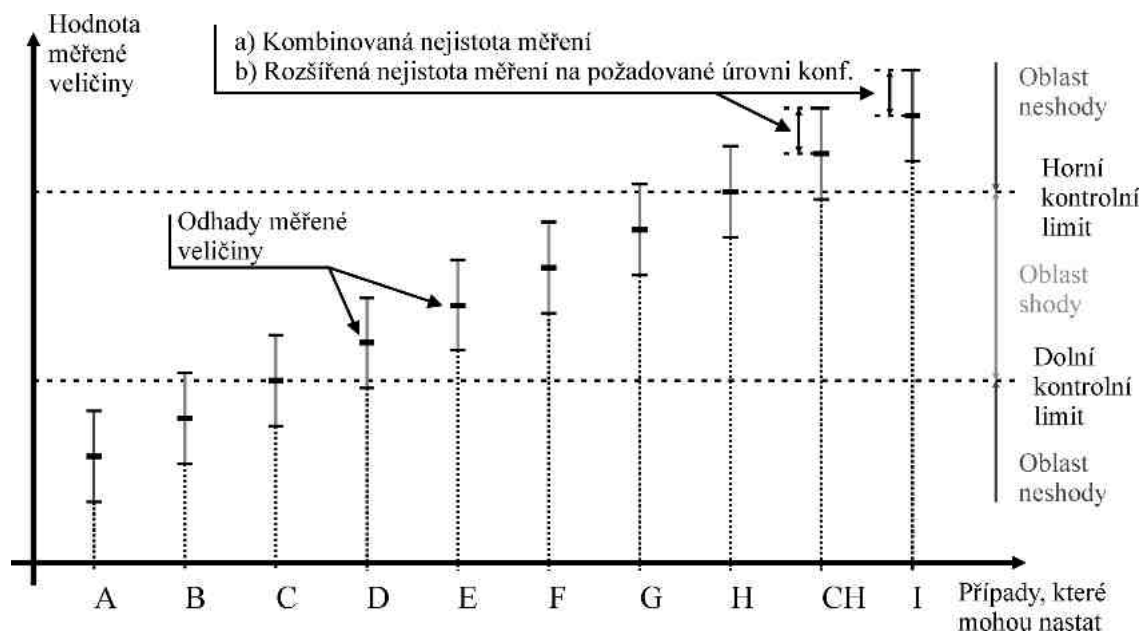
- každá složka nejistoty je kvantifikována standardní odchylkou
- každá systematická chyba může být vyrovnána a jakákoliv nejistota je nejistota této korekce
- všechny intervaly nejistoty jsou symetrické

Protože cílem každého měření je určit hodnotu výstupní měřené veličiny, měření musí začínat vhodnou definicí této výstupní veličiny, následovanou volbou metody a postupu měření. Jak už bylo řečeno, výsledek je vždy odhadem skutečné hodnoty měřené veličiny, a proto je kompletní, jen je-li doprovázen údajem o nejistotě tohoto odhadu.

V předchozím textu byl objasněn rozdíl mezi chybou a nejistotou měření. Z této odlišnosti vyplývá, že nejistota měření nemůže být použita k opravení výsledku měření. Z druhého základního pravidla pro vyjadřování nejistoty měření je zřejmé, že v případě, že bylo měření očištěno o systematickou chybu vhodnou korekcí, je třeba výslednou nejistotu měření rozšířit o nejistotu této korekce. Nejistota výsledku měření tedy odráží nedostatek přesné znalosti hodnoty měřené veličiny a výsledek měření po korekci známých systematických vlivů je stále jen odhadem hodnoty měřené veličiny. Z podstaty nejistoty vyplývá, že i když bude stanovená nejistota velká, tak se přesto může výsledek velmi blížit hodnotě měřené veličiny.

### **2.1.2 Nejistota a posuzování shody**

Nejistota měření má zásadní význam při posuzování shody, které v principu spočívá v porovnání naměřené hodnoty s požadavky na měřený parametr. Tento typ vyhodnocování je v praxi tou nejběžnější formou zpracování výsledků. V podstatě jde o to zjistit, zda měřený parametr překročil či nepřekročil určitou mez, nebo zda je v rozmezí stanoveném intervalem. Protože žádný výsledek měření nemůže být naprosto přesný, tak vznikají problémy s posuzováním výsledků, které se dostávají do blízkosti vymezené hranice neshody. Na Obr. 2 je zobrazena role nejistoty při posuzování shody.



Obr. 2: Role nejistoty měření pro posuzování shody

Rozdíly mezi intervalem vymezeným kombinovanou nejistotou a intervalem vymezeným rozšířenou nejistotou budou dále podrobněji vysvětleny v kap. 2.1.6 a 2.1.7. Kombinovaná nejistota je souhrnem všech odhadů rozptylu jednotlivých složek nejistoty a rozšířená nejistota je již přímo interval, ve kterém se měřená veličina vyskytuje s požadovanou pravděpodobností. Při posuzování shody vždy porovnáváme interval vymezený odhadem měřené veličiny a nejistotou tohoto odhadu.

Na Obr. 2 jsou vidět čtyři možné situace: A, I – Naměřená hodnota je mimo požadavky, a to i včetně intervalu příslušejícího nejistotě měření, v tom případě výsledek nevyhověl a můžeme prohlásit neshodu. B, CH – Naměřená hodnota je sice mimo požadovaný interval, ale vzhledem k nejistotě měření je určitá pravděpodobnost, že sledovaný parametr je v mezích, nemůžeme tedy prohlásit shodu ani neshodu, ale výsledek nevyhověl. C, H – Odhad měřené veličiny je na rozhraní mezi shodou a neshodou. D, G – Naměřená hodnota je v mezích, vzhledem k nejistotě měření je určitá pravděpodobnost, že sledovaný parametr nevyhověl požadavkům, v tom případě nemůžeme prohlásit shodu ani neshodu, ale výsledek nevyhověl. E, F – Výsledek je v tolerančních mezích a to včetně intervalu příslušejícího nejistotě měření, v tom případě můžeme prohlásit shodu a výsledek vyhověl. Všechny zmiňované výroky o shodě a neshodě výsledku jsou samozřejmě na uvažované hladině konfidence. Výsledek, u kterého jsme nemohli prohlásit shodu s pravděpodobností 99 %, může požadavky splňovat na 95% či nižší konfidenční úrovni.

Tato interpretace je nasnadě, ale směrnice k posuzování a prokazování shody se specifikací [21], kterou vydalo v roce 1996 Mezinárodní sdružení pro certifikaci, uvádí i jinou možnost. Posouzení shody proběhne podle popsaného scénáře pouze v případě, kdy je to tak výslovně požadováno. Tato směrnice však také uvádí možnost úplného vyřazení nejistoty z procesu posuzování shody s tím, že lze posuzovat pouze naměřenou hodnotu, a riziko toho, že posouzení proběhne špatně, by se akceptovalo.

Takovýto postup je však vyloučený tam, kde je uvažování nejistot nařízeno. Dle mého úsudku je tento způsob posuzování shody nevhodný a nerespektuje ani základní přesnost měřicí metody, natož celkovou pochybnost o správnosti výsledku měření. Na druhou stranu je pravda, že tento koncept tzv. sdíleného rizika má v určitých situacích své opodstatnění.

Koncept sdíleného rizika je takový, že se nejistota při posuzování shody vůbec neuvažuje v případě, když je nejistota měřicího systému malá v porovnání s limity pro posuzovaný vzorek. Existuje určité riziko, že se prohlásí shoda pro neshodný výsledek, nebo že se naopak prohlásí neshoda pro výrobek neshodný. A právě toto riziko, které zasahuje jak odběratele, tak dodavatele, se označuje jako sdílené riziko. Na první pohled se může tento koncept zdát nevyhovující, ale musíme si uvědomit, že vzhledem k uvedenému poměru nejistoty k posuzovaným limitům může být toto riziko velice malé, v některých případech vůbec žádné. Při teoretickém rozboru je samozřejmě nulové riziko vyloučeno, ale v praxi lze takto uvažovat.

Mohou se totiž vyskytnout případy, kdy požadovaná úroveň napětí je určena maximální hodnotou např. 1 kV a rozšířená nejistota změřeného výsledku 2 V. Záleží samozřejmě na aplikaci, ale v mnoha případech je sice stanovená hranice 1 kV, ale v podstatě je přijatelné i napětí 1050 V. Když je v takovém případě naměřená hodnota 999 V, tak je na dané konfidenční hladině teoreticky vysoké riziko neshody, ale pro praktickou aplikaci výrobek téměř na 100 % vyhovuje (záleží samozřejmě na konfidenční hladině, pro kterou byla rozšířená nejistota 2 V uvažovaná).

Z tohoto praktického příkladu jednoznačně vyplývá to, že při posuzování musíme brát v potaz:

- a) nejistotu měření
- b) toleranci pro limitní hodnotu

Pokud je nejistota měření vzhledem k udané toleranci zanedbatelná, může se při posuzování shody posuzovat jen naměřená hodnota. V praxi se proto často volí přesnost měřidla a metodiky tak, aby mohl být výsledek měření použit k posouzení shody bez uvažování nejistoty měření. Při vyšších požadavcích na přesnost a spolehlivost, ale tento přístup selhává, protože dostatečně přesné přístroje nejsou dosažitelné.

Přístup sdíleného rizika je doporučován například i Evropskou spoluprací v legální metrologii. Ta v dokumentu [23] doporučuje v situacích, kdy je nejistota měřicího systému vůči požadavkům na měřené výrobky malá, použít právě tradiční postup sdíleného rizika. Tato praxe je dle Evropské spolupráce v legální metrologii v souladu se směrnicí EU 90/384/EEC [24] a to i na úrovni notifikovaných orgánů jednotlivých států. K tomu je samozřejmě nutné doplnit, že záleží vždy na účelu, za kterým se posuzování shody provádí.

V případě, že koncept sdíleného rizika použít nelze, doporučuje [21] postup obdobný popisu Obr. 2, s tím že v případě absence jakýchkoliv kritérií, zkušebních specifikací nebo požadavků zákazníka požadavků zákazníka je doporučena konfidenční úroveň 95 %. V textu směrnice je používáno termínu „polovina intervalu rozšířené nejistoty“. Je třeba si dát pozor na to, že tento termín odpovídá přímo rozšířené nejistotě  $U$  a ne jeho polovině (Termín rozšířená nejistota měření a její výpočet bude popsán v následujícím textu, pro posuzování shody stačí vědět, že je to interval  $\pm U$  kolem naměřené hodnoty obsahuje hodnotu měřené veličiny s požadovanou pravděpodobností). Celkový interval je totiž  $2 \cdot U$ . Kdyby se uvažovala polovina  $U_{95}$ , tak by výsledné prohlášení shody bylo zhruba na hladině pravděpodobnosti 68 % (za předpokladu, že koeficient krytí je cca 2, viz kap. 2.1.7). Takovéto posouzení shody je již nespolehlivé. Na druhou stranu takový interval odpovídá kombinované nejistotě, která se někdy po porovnání také používá. A to právě ve výše zmíněných případech, kdy relativní nejistota je vzhledem k požadovaným tolerančním hranicím minimální. Co se týče poměru nejistoty a tolerančního intervalu v případě posuzování rozšířené nejistoty, tak [21] uvádí mezní použitelný poměr 1:3. Sporné případy B, CH a D, G z Obr. 2 řeší [21] tak, že se prohlásí shoda či neshoda s tím,

že její pravděpodobnost je menší než 95 % (z toho je vidět, že je opravdu použito rozšíření o  $U$  a ne o  $\frac{1}{2} U$ ). Podobně zní závěr dokumentu [22] Akreditační služby Spojeného království, ve kterém se praví, že v případě překročení limitů výsledkem rozšířeným nejistotou s konfidenční úrovní 95 % nelze shodu na této konfidenční úrovni posoudit, nicméně výsledek ukazuje, zda je pravděpodobnější shoda či neshoda.

### 2.1.3 Zdroje nejistoty měření

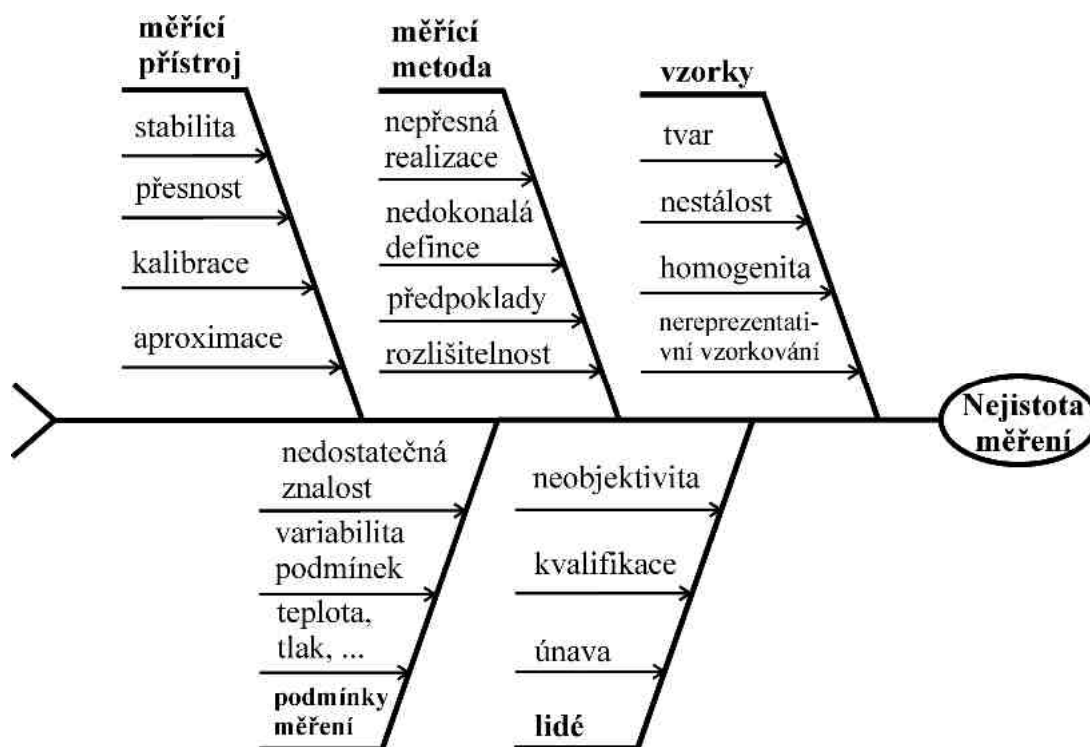
Pro výpočet nejistoty měření je nutné identifikovat všechny její zdroje. Jsou to vlivy, které jsou příčinou naší pochybnosti o správnosti výsledku měření. V praxi existuje mnoho zdrojů nejistoty. Mezi nejčastěji uváděné patří tyto:

- neúplná definice výstupní měřené veličiny
- nesprávná realizace definice výstupní měřené veličiny
- nesprávný odběr vzorků
- nedostatečná znalost vlivu podmínek měření nebo nedokonalé změření
- chyba čtení (při čtení údajů především u analogových prostředků)
- omezená rozlišitelnost měřicího prostředku
- nesprávné přizpůsobení členů měřicího řetězce
- nepřesné hodnoty měřicích standardů a referenčních materiálů
- nepřesné hodnoty konstant a parametrů získaných z vnějších zdrojů
- aproximace a předpoklady začleněné do měřicích metod a postupů
- kolísání hodnot měřené veličiny při opakovaných měřeních za stejných podmínek

Tyto zdroje nemusí být nutně nezávislé a některé z nich mohou přispívat ke kolísání hodnot měřené veličiny při opakovaných měřeních [20].

Při každém vyjadřování nejistoty je třeba všechny významné zdroje identifikovat. V praxi se postupuje tak, že se sledují vlivy změn ovlivnitelných podmínek na výsledek měření. Jako vhodný nástroj pro analýzu se jeví použití diagramu příčin a následku. Po identifikování všech zdrojů je vhodné provést zjednodušení pouze na významné zdroje a také vyloučit duplicitní uvažování některých příčin. Při konstrukci diagramu pro zdroje nejistoty se zpravidla postupuje tak, že se jako hlavní větve uvedou parametry definice výstupní měřené veličiny. Jako další větev se přidává korekce na systematické chyby. Dále se posuzují jednotlivé kroky měřicí metody a rozvádějí se další faktory, které vycházejí z hlavních větví. Faktory se zpravidla rozpracovávají hlouběji a hlouběji, až na úroveň, kdy je jejich vliv na výsledek zanedbatelný. Poté se pročistí strom o duplicitní zdroje a o zdroje, které se navzájem vyruší. Jednotlivé skupiny příčin se přeskupí tak, aby byly přehlednější, většinou se podle těchto skupin přetvoří i hlavní větve diagramu. Také se často stává, že některé příčiny se jmenují stejně nebo podobně. V případě, že se jedná o podobné příčiny se stejným dopadem, tak se slučují, v případě, že mají odlišnou podstatu, tak je třeba je přejmenovat a tím řádně odlišit. Analýza téhož měření nepovede vždy ke stejnému diagramu příčin a následků, ale to nesnižuje použitelnost této metodiky. Někdy se identifikují významné zdroje nejistoty tak, že je třeba upravit vztah pro výstupní měřenou veličinu přidáním nové veličiny.

Uvedený postup identifikace a uspořádání zdrojů nejistot je zpracovaný dle [31]. Příkladem takového diagramu je následující Obr. 3.



Obr. 3: Příklad Isikawa diagramu pro identifikaci zdrojů nejistot měření

Pro každý významný zdroj nejistoty se musí vyjádřit příslušná nejistota. Nejistoty měření se dělí podle typu na dvě skupiny, a to na *nejistoty typu A* a *nejistoty typu B* [4]. Mezi složky nejistoty typu A jsou zahrnovány všechny složky nejistoty určené statistickým rozbohem série měření, mezi složky typu B se pak počítají všechny složky nejistot stanovené jinými metodami. Oba tyto typy nejistot jsou založeny na rozdělení pravděpodobnosti a složky nejistot vycházející z obou těchto typů jsou kvantifikovány pomocí rozptylů či směrodatných odchylek. To znamená, že ač rozlišujeme nejistoty typu A a typu B podle postupu výpočtu, ve výsledku se neliší, to znamená, že mají stejný význam i rozměr. Odhad rozptylu  $u^2$  charakterizujícího nejistotu typu A je počítán ze série opakovaných měření a odpovídá statistickému odhadu rozptylu  $s^2$ . Pro složky nejistoty typu B je odhad rozptylu  $u^2$  vyjádřen za použití všech dostupných informací a znalostí. Kladně brané druhé odmocniny z těchto rozptylů jsou odhady směrodatných odchylek  $u$  a označují se jako typ A, resp. typ B standardní nejistoty [4].

Typ A standardní nejistoty je tedy získán z funkce hustoty pravděpodobnosti derivací distribuční funkce, zatímco typ B standardní nejistoty je získán z předpokládané funkce hustoty pravděpodobnosti založené na stupni důvěry, že případ nastane [25], [4].

Nejistota měření, která se skládá z několika složek typu A nebo B se nazývá *kombinovanou standardní nejistotou* a označuje se jako  $u_c$ . Tedy i výsledná nejistota měření přiřazená výsledku je vlastně kombinovanou nejistotou (pakliže se skládá z více než jedné složky), a je tedy odhadem spojeným s výsledkem měření, rovným druhé odmocnině kombinovaného rozptylu získaného ze všech rozptylů a kovariancí.

Význam tzv. *rozšířené nejistoty*, která již plně odpovídá požadavkům na vyjádření výsledku měření, byl nastíněn v kapitole 2.1.2. Úkolem rozšířené nejistoty je určení takového intervalu okolo výsledku měření, od něž lze očekávat, že zahrnuje velkou část hodnot rozdělení, které lze přisuzovat měřené veličině. Rozšířená nejistota se značí symbolem  $U$  a získá se vynásobením kombinované standardní nejistoty  $u_c$  koeficientem krytí  $k$ . Významem tohoto koeficientu a podrobnostmi výpočtu rozšířené nejistoty se bude

zabývat kapitola 2.1.7. Rozšířenou nejistotou se uzavírá seznam všech nejistot, které lze na základě identifikovaných zdrojů vypočítat. Vraťme se ale zpět k přiřazení nejistot jejich jednotlivým zdrojům.

Pokud se nejedná o přímé měření, tak je výstupní měřená veličina  $Y$  vyjádřena pomocí  $N$  dalších veličin  $X_1, X_2, \dots, X_N$  následující funkcí  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (2.1)$$

kde veličiny  $X_1, X_2, \dots, X_N$  jsou označovány jako vstupní veličiny a jejich odhady se značí  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Již bylo řečeno, že jestliže analýza zdrojů nejistot odhalí, že model  $f$  neodpovídá stupni požadované přesnosti výsledku měření, tak musí být do této funkce zahrnuty další vstupní veličiny. Soubor vstupních veličin se může dělit na dvě podskupiny, a to na veličiny, jejichž hodnoty a nejistoty jsou přímo stanoveny měřením, a na veličiny, jejichž hodnoty a nejistoty jsou vneseny do měření z externích zdrojů.

Odhad měřené veličiny  $Y$ , označován jako  $y$ , je získán z rovnice (2.1) nahrazením  $N$  vstupních veličin  $X_1, X_2, \dots, X_N$  jejich odhady. Platí tedy:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (2.2)$$

Každý vstupní odhad  $x_i$  a s ním spojená nejistota  $u(x_i)$ , jsou získány z rozdělení možných hodnot vstupní veličiny  $X_i$ . Toto rozdělení pravděpodobnosti může být založeno na frekvenčním rozložení (typ A), či apriori rozložení (typ B).

#### 2.1.4 Nejistota typu A

Pro nejistoty typu A je ve většině případů nejdostupnějším odhadem očekávané hodnoty veličiny  $q$ , která se náhodně mění a pro kterou bylo získáno za stejných podmínek měření  $n$  nezávislých měření  $q_k$ , aritmetický průměr nebo střední hodnota  $\bar{q}$  z  $n$  měření.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n q_k \quad (2.3)$$

Pro vstupní veličinu  $X_i$  odhadnutou z  $n$  nezávislých opakování měření  $X_{i,k}$  je aritmetický průměr  $\bar{X}_i$  získaný z rovnice (2.3) použit jako vstupní odhad  $x_i$  v rovnici (2.2) pro určení výsledku  $y$ ; tedy  $x_i = \bar{X}_i$ . Výběrový rozptyl měření, který je odhadem rozptylu  $\sigma^2$  rozdělení pravděpodobnosti veličiny  $q$ , je dán vztahem

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (2.4)$$

Odhad rozptylu a jeho kladná druhá odmocnina  $s(q_k)$ , nazývaná výběrová směrodatná odchylka, charakterizují kolísání pozorovaných hodnot  $q_k$ , nebo odborněji, jejich rozptyl kolem aritmetického průměru  $\bar{q}$ .

Pro vyjádření standardní nejistoty typu A je nejlepší odhad  $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$  rozptylu od průměru dán vztahem

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (2.5)$$

Výběrový rozptyl od průměru  $s^2(\bar{q})$  a výběrová směrodatná odchylka od průměru  $s(\bar{q})$ , rovná kladné druhé odmocnině  $s^2(\bar{q})$ , kvantifikují, do jaké míry  $\bar{q}$  odpovídá očekávání střední hodnoty  $\mu_q$  veličiny  $q$ . Jak rozptyl, tak i směrodatná odchylka mohou být použity jako míra nejistoty  $q$ .

Standardní nejistota  $u(x_i)$  odhadu  $x_i = \bar{X}_i$  vstupní veličiny  $X_i$  určené z  $n$  nezávislých opakování měření  $X_{i,k}$  je rovna  $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$ , kde  $s^2(\bar{X}_i)$  je vypočten podle rovnice (2.5). Nejistota  $u(x_i)$  se nazývá standardní nejistota typu A a  $u(x_i)^2$  se označuje jako rozptyl typu A.

Pokud předchozí rovnice (2.3), (2.4) a (2.5) shrneme do jednoho vztahu, tak nám vyjde, že nejistota typu A  $u_A$  je rovna

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right)^2}. \quad (2.6)$$

Mohlo by se tedy zdát, že vypočítat nejistotu měření typu A ze série naměřených dat není problémem. To bohužel není pravda, protože ne pro všechny zdroje měření je toto vyjádření nejistoty typu A správné. Za prvé může nastat případ, ve kterém nemáme dostatek dat pro spolehlivý odhad, za druhé pokud jsou změny vstupních veličin korelované, tak výběrová směrodatná odchylka nemusí být vhodným odhadem [25], a za třetí platí uvedené vztahy pouze v případě normálního rozložení.

Zjednodušeně řečeno, aritmetický průměr a směrodatnou odchylku nelze jako odhady použít vždy. Předpoklad normálního rozložení je třeba ověřit. Když statistické testy nepotvrdí možnost normálního rozložení, musíme vybrat jiné, které bude naměřeným datům lépe odpovídat. Nejhorší je případ, kdy nemáme dostatek dat pro statistickou analýzu, v takovém případě nelze nejistotu typu A početně stanovit. Výsledkem by totiž bylo číslo, které nemá žádný reálný podklad. V takovém případě musí odborník za pomoci svých zkušeností rozptyl měřených hodnot odhadnout a přiřadit mu stupně volnosti (viz kap. 2.1.7.).

### 2.1.5 Nejistota typu B

Pro odhad  $x_i$  vstupní veličiny  $X_i$ , která nebyla získána statistickou analýzou naměřených dat, se stanovuje odhad rozptylu  $u^2(x_i)$  nebo standardní nejistota  $u(x_i)$  vědeckým úsudkem založeným na všech dostupných informacích o možném kolísání  $X_i$ . Takový souhrn informací může dle [25] zahrnovat

- předchozí měřená data
- zkušenosti s nebo obecné znalosti funkce a vlastností týkající se materiálů a zařízení
- výrobní specifikace
- data poskytnutá kalibrací a jinými certifikáty
- nejistoty stanovené pro referenční data získané z literatury

Hlavním zdrojem informací by měl v případě měřicího zařízení být výrobce a vše potřebné by mělo být součástí dokumentace.

Řádné určení standardní nejistoty typu B vyžaduje shromáždění dostupných informací pro získání přehledu založeného na zkušenostech a všeobecných znalostech, které mohou být získány praxí. Je-li odhad  $x_i$  získán z výrobních specifikací, kalibračních



certifikátů, literatury nebo z jiného zdroje a jeho citovaná nejistota je uvedena jako určitý násobek směrodatné odchylky, standardní nejistota  $u(x_i)$  je jednoduše citovaná hodnota dělená násobitelem (tedy koeficientem krytí, viz kap. 2.1.7) a odhad rozptylu  $u^2(x_i)$  je jejím kvadrátem.

Podle zásad zapisování nejistoty měření by se nemělo stávat, že je uvedena pouze konfidenční úroveň bez použitého koeficientu krytí. Pakliže tato situace přece jen nastane, tak je doporučován předpoklad normálního rozdělení. V tom případě se koeficient krytí odhadne jako odpovídající součinitel normálního rozložení pro danou konfidenční hladinu.

Velmi často nastává při vyjadřování nejistoty typu B situace, kdy jsme schopni odhadnout pouze hranice  $X_i$ . Potom označujeme horní mez jako  $a_+$  a dolní mez jako  $a_-$ . Jestliže je střední nebo očekávaná hodnota  $x_i$  veličiny  $X_i$  ve středu takto vymezeného intervalu, tedy platí, že  $x_i = (a_- + a_+)/2$ , tak se polovina délky vymezeného intervalu označuje jako tzv. pološíře  $a$ , tedy

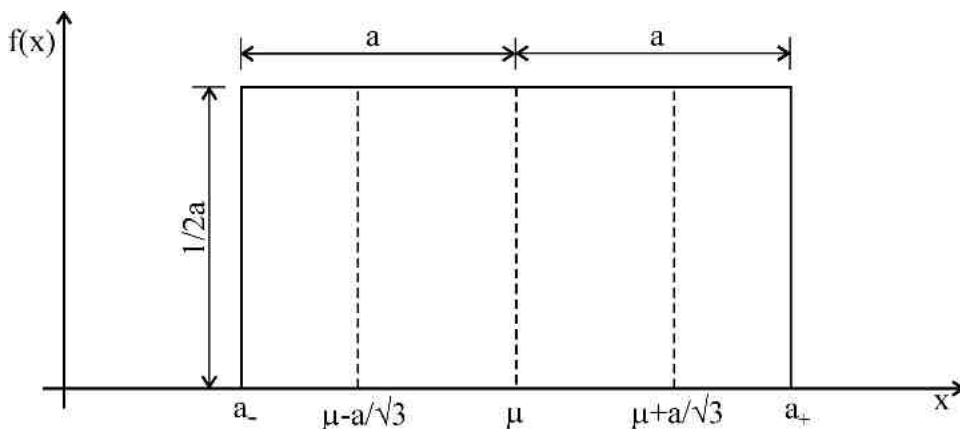
$$a = (a_+ - a_-) / 2. \quad (2.7)$$

Jsou-li takto vymezeny hranice, můžeme na základně dalších dostupných informací předpokládat rozložení veličiny  $X_i$ . Z praktického hlediska se většinou předpokládá, že pravděpodobnost toho, že  $X_i$  bude ležet mimo vymezený interval, je nulová. Jinak řečeno,  $X_i$  určitě leží uvnitř intervalu. Není-li k dispozici žádná informace o rozložení  $X_i$  ve vymezeném intervalu, tak je jediná možnost předpokládat výskyt této veličiny kdekoliv uvnitř intervalu se stejnou pravděpodobností, tedy rovnoměrné rozložení hodnot (viz Obr. 4). Potom bude rozptyl nejistoty typu B roven

$$u_B^2(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad (2.8)$$

Vyjádříme-li nejistotu pomocí pološíře  $a$ , tak dostaneme

$$u_B^2(x_i) = \frac{a^2}{3} \quad (2.9)$$



Obr. 4: Rovnoměrné rozložení hodnot

Může ale nastat situace, kdy hranice nebudou vzhledem k nejlepšímu odhadu  $x_i$  symetrické, to znamená,  $a_+ - x_i \neq x_i - a_-$ . Z toho plyne, že rozdělení pravděpodobnosti  $X_i$  nemůže být stejné v celém intervalu. Nedostatek informací pak může vést k různým modelům rozložení pravděpodobnosti, a ty pak k různým vyjádřením rozptylu. Nejčastějším případem je bohužel absence jakýchkoliv dalších informací, kromě mezí  $a_+$  a

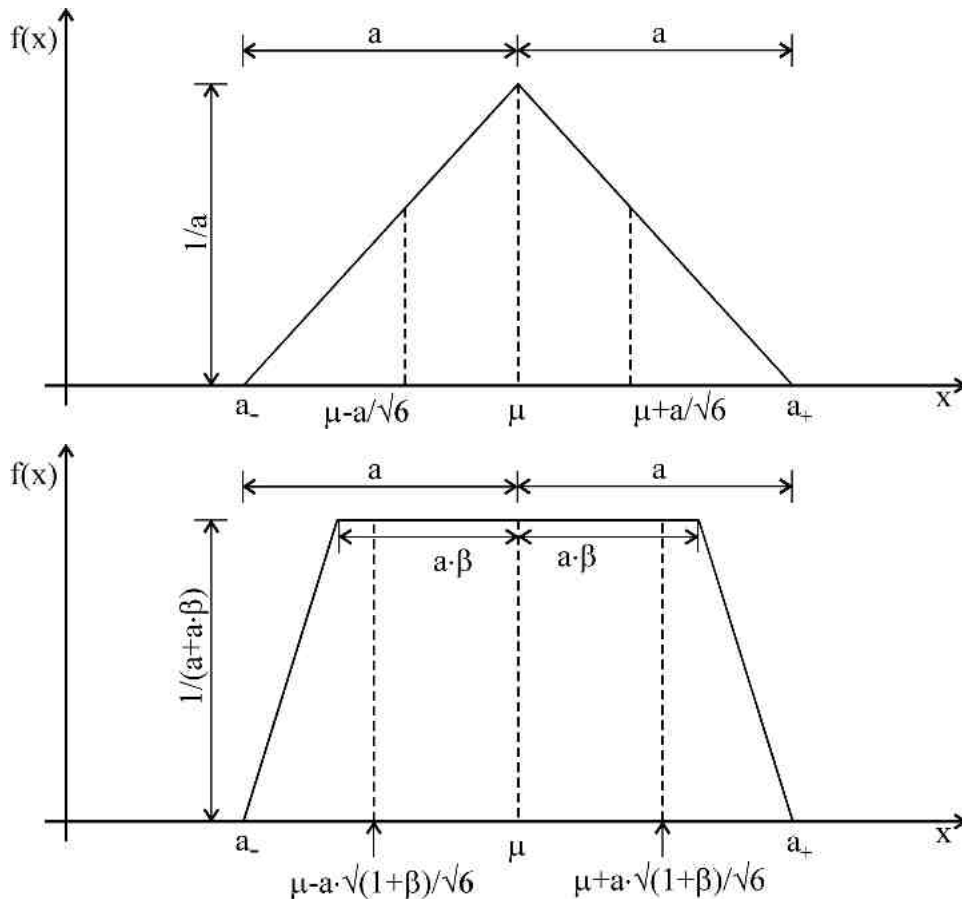
$a_-$ . V tom případě se doporučuje užít nejjednodušší možnou aproximaci, tedy to přímo vzorec (2.8) a tím předpokládat rovnoměrné rozložení v celém intervalu  $a_-$  až  $a_+$ .

Podle [25] je v některých situacích rozumné nahradit symetrické rovnoměrné rozložení symetrickým lichoběžníkovým rozložením, které má základnu šířky  $a_+ - a_- = 2 \cdot a$ , a horní stranu šířky  $2 \cdot a \cdot \beta$ , kde  $\beta$  je číslo z intervalu  $0 \leq \beta \leq 1$ . Je-li  $\beta \rightarrow 1$ , pak se lichoběžníkové rozložení přibližuje rovnoměrnému rozložení; je-li  $\beta = 0$ , tak se jedná rozložení trojúhelníkové. Za předpokladu lichoběžníkového rozložení veličiny  $X_i$  se nejistota měření typu B vypočítá podle vztahu

$$u_B^2(x_i) = \frac{a^2 \cdot (1 + \beta)}{6}, \quad (2.10)$$

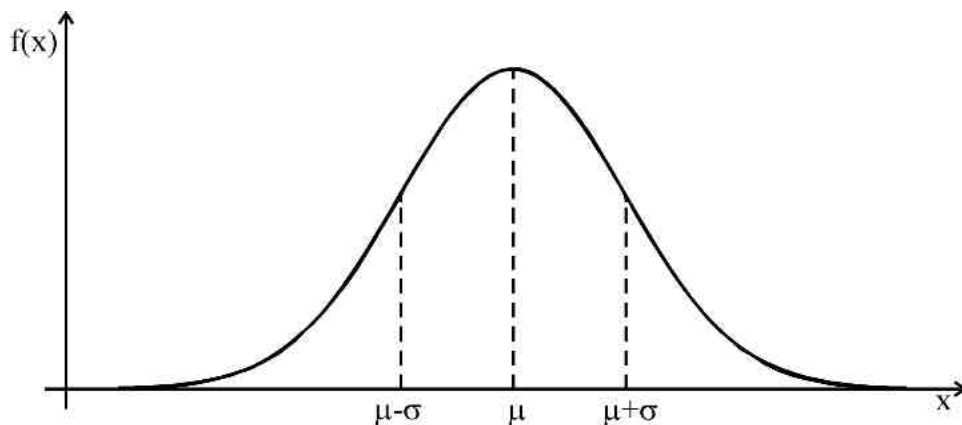
který pro trojúhelníkové rozdělení ( $\beta=0$ ) přechází na tvar

$$u_B^2(x_i) = \frac{a^2}{6}. \quad (2.11)$$



Obr. 5: Trojúhelníkové a lichoběžníkové rozložení pravděpodobnosti

Předpokládané rozložení pravděpodobnosti může být ale jakékoliv jiné. Hojně se také využívá rozložení normálního, kde je rozložení veličiny  $X_i$  charakterizováno klasicky pomocí střední hodnoty a směrodatné hodnoty.



Obr. 6: Normální rozložení pravděpodobnosti

Poslední zásadu vyjadřování nejistoty typu B, kterou je třeba připomenout, a která již byla zmíněna v souvislosti se zdroji nejistot, je zamezení duplicitního započtení některé složky nejistoty. Jestliže je složka nejistoty vycházející z jednotlivých vlivů vyjádřena jako typ B, mělo by se zamezit tomu, aby zahrnovala vlivy přispívající k pozorované proměnlivosti měření, které jsou již zahrnuty ve složkách nejistoty typu A.

Obecně vzato je s vyjadřováním nejistoty typu B mnohem více problémů než u typu A. Je zde totiž mnohem větší prostor pro odborné úsudky, které se mohou znatelně lišit. Pokud není toto zahrnuto do výsledné rozšířené nejistoty (viz kapitola 2.1.7), tak to může být příčinou různých výsledků pro stejné měření a tím prakticky padá význam nejistoty jako jednoznačného parametru měření. Proto je důležité slovně popsat způsob výpočtu nejistoty typu B, aby bylo jasné, co vše je v této nejistotě zahrnuto. Dalším problémem je stanovení popsaných mezí  $a_+$  a  $a_-$ . Tyto meze se získávají přímo z údajů výrobce přístroje, ale může se stát, že tyto údaje se nebudou shodovat s reálnou charakteristikou přístroje. Nakonec nezbývá než ověřit naměřené údaje jiným přístrojem a v případě rozporů požadovat po výrobcích vysvětlení. Často není ale jiný přístroj k dispozici nebo výrobce trvá na uvedených údajích. Z toho je vidět, že i u tak podstatného zdroje nejistot, jakým je přesnost měřicích přístrojů, bývá problém s jeho kvantifikací. Určitým řešením jsou kalibrační měření, která budou rozebrána dále (viz kapitola 2.2).

### 2.1.6 Kombinovaná nejistota

Kombinovanou standardní nejistotou se označuje míra nejistoty výsledku měření, která byla získána z několika složek nejistot. V podstatě se jedná o odhad směrodatné odchylky spojený s výsledkem měření, který je roven kladné druhé odmocnině kombinovaného rozptylu získaného ze všech rozptylů vstupních veličin a ze všech kovariancí. Postupy pro stanovení kombinované standardní nejistoty měření se různí pro nekorelované a korelované vstupní veličiny. Pro nekorelované vstupní veličiny je výpočet jednodušší, protože se v podstatě jedná o speciální případ, kdy je korelace nulová a proto se všechny členy výpočtu zahrnující korelaci neuplatní.

#### 2.1.6.1 Nekorelované vstupní veličiny

V případě nezávislých vstupních nejistot se kombinovanou standardní nejistotou  $u_c(y)$  myslí standardní nejistota odhadu  $y$  výstupní měřené veličiny  $Y$ . Odpovídá tedy standardní nejistotě výsledku měření a získává se sloučením standardních nejistot vstupních odhadů  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Stejně jako u ostatních standardních nejistot je kombinovaná standardní nejistota dána druhou odmocninou kombinovaného rozptylu  $u_c^2(y)$ . Tento rozptyl je dán vztahem

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (2.12)$$

kde  $f$  je funkce daná rovnicí (2.1) a  $u(x_i)$  jsou standardní nejistoty typu A nebo typu B. Rovnice (2.12) je založena na aproximaci Taylorovou řadou prvního řádu, je-li nelinearita funkce  $f$  významná, je třeba rovnici (2.12) rozšířit o další členy Taylorovy řady vyššího řádu [25].

Parciální derivace  $\partial f / \partial x_i$  jsou rovné derivacím  $\partial f / \partial X_i$  stanoveným pro  $X_i = x_i$ . Tyto derivace (často nazývané *koeficienty citlivosti*) popisují, jak se mění odhad výstupní veličiny  $y$  se změnami hodnot vstupních odhadů  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Změny  $y$  způsobené malými změnami  $\Delta x_i$  vstupních odhadů  $x_i$  jsou dány  $(\Delta y)_i = (\partial f / \partial x_i) (\Delta x_i)$ . Je-li tato změna generována standardní nejistotou odhadu  $x_i$ , související kolísání  $y$  je  $(\partial f / \partial x_i) u(x_i)$ . Kombinovaný rozptyl  $u_c^2(y)$  může být proto vyjádřen jako suma členů, z nichž každý reprezentuje odhadnutý rozptyl spojený s výstupním odhadem  $y$  generovaným odhadnutým rozptylem spojeným s každým vstupním odhadem  $x_i$  [20]. Na základě tohoto předpokladu zapisujeme rovnici (2.12) jako

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y), \quad (2.13)$$

kde

$$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad u_i(y) \equiv |c_i| \cdot u(x_i). \quad (2.14)$$

Význam takto vyjádřených koeficientů citlivosti spočívá v tom, že se dají určovat z funkce  $f$  experimentálně, změřením změny  $Y$  vyvolané změnou jedné veličiny  $X_i$ , zatímco ostatní vstupní veličiny jsou udržovány konstantní. V těchto případech je znalost funkce  $f$  (nebo její části, když jsou určeny pouze některé koeficienty citlivosti) proto redukována na empirický rozvoj Taylorovy řady prvního řádu založené na naměřených koeficientech citlivosti.

Pokud je funkce  $f$  definována jako součet nebo rozdíl vstupních veličin  $X_i$  (2.15), tak je odhad hodnoty výstupní veličiny dán součtem či rozdílem odpovídajících odhadů hodnot vstupních veličin (2.16).

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i \quad (2.15)$$

$$y = \sum_{i=1}^N p_i x_i \quad (2.16)$$

Protože hodnoty koeficientů citlivosti jsou rovny  $p_i$  a vztah (2.12) přechází na tvar:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 u^2(x_i) \quad (2.17)$$

Pokud je funkce  $f$  definována jako součin nebo podíl vstupních veličin  $X_i$  (2.18), je odhad hodnoty výstupní veličiny dán součinem či podílem odpovídajících odhadů hodnot vstupních veličin (2.19).

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (2.18)$$

$$y = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (2.19)$$

V tomto případě jsou koeficienty citlivosti rovny  $p_i y/x_i$ , a pokud jsou použity relativní standardní nejistoty  $w(y) = u(y)/|y|$  a  $w(x_i) = u(x_i)/|x_i|$  je možné ze vztahu (2.12) odvodit vzorec (2.20) [26].

$$w^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(x_i) \quad (2.20)$$

### 2.1.6.2 Korelované vstupní veličiny

Rovnice (2.12) platí pouze tehdy, jsou-li vstupní veličiny  $X_i$  nezávislé. Pokud jsou nějaké vstupní veličiny korelované, musí být tato korelace vzata v úvahu. Kombinovaný rozptyl spojený s výsledkem měření, ve které je zahrnuta i míra korelací mezi vstupními veličinami je vyjádřena vztahem

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i^{(k)}} \frac{\partial f}{\partial x_j^{(k)}} u(x_i^{(k)}, x_j^{(k)}) \quad (2.21)$$

kde  $x_i^{(k)}$  a  $x_j^{(k)}$  jsou odhady korelovaných vstupních veličin  $X_i^{(k)}$  a  $X_j^{(k)}$  a  $u(x_i^{(k)}, x_j^{(k)})$  je odhad kovariance spojené s  $x_i^{(k)}$  a  $x_j^{(k)}$ . Stupeň korelace mezi  $x_i^{(k)}$  a  $x_j^{(k)}$  je charakterizován odhadem výběrového korelačního koeficientu

$$r(x_i^{(k)}, x_j^{(k)}) = \frac{u(x_i^{(k)}, x_j^{(k)})}{u(x_i^{(k)})u(x_j^{(k)})} \quad (2.22)$$

přičemž platí, že  $r(x_i^{(k)}, x_j^{(k)}) = r(x_j^{(k)}, x_i^{(k)})$  a korelační koeficient může nabývat hodnot v intervalu  $\langle -1; 1 \rangle$ . Jsou-li odhady vstupních veličin  $x_i^{(k)}$  a  $x_j^{(k)}$  nezávislé, tedy změna jedné veličiny neznamená předpokládanou změnu jiné, pak bude korelační koeficient  $r(x_i^{(k)}, x_j^{(k)})$  nulový. Rozšiřující část pravé strany rovnice (2.21) může být pomocí korelačního koeficientu zapsána jako (2.23). Pokud použijeme k zápisu rovnice (2.21) koeficienty citlivosti ze vztahu (2.14), dostaneme vztah (2.24).

$$2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i^{(k)}} \frac{\partial f}{\partial x_j^{(k)}} u(x_i^{(k)})u(x_j^{(k)})r(x_i^{(k)}, x_j^{(k)}) \quad (2.23)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i^{(k)} c_j^{(k)} u(x_i^{(k)})u(x_j^{(k)})r(x_i^{(k)}, x_j^{(k)}) \quad (2.24)$$

Význam symbolů zůstává stejný, jako u předchozích rovnic (2.12)-(2.22).

Jednotlivé závislosti několika vstupních veličin se dají vyjádřit v tzv. *kovariační matici*  $u_{ij}(k)$ , kde na diagonále leží rozptyly  $u^2(x_i(k))$ , zatímco mimo-diagonální prvky matice tvoří kovariance  $u(x_i(k), x_j(k)) = u(x_j(k), x_i(k))$ . Je zřejmé, že pokud jsou všechny vstupní veličiny nezávislé, tak všechny mimo-diagonální prvky kovariační matice jsou nulové.

Odhadnutý výběrový korelační koeficient veličin  $X_i^{(k)}$  a  $X_j^{(k)}$ , který byl použit ve vztazích (2.23) a (2.24) se spočítá z  $n$  nezávislých párů simulovaných měření  $X_i^{(k)}$  a  $X_j^{(k)}$  prováděných za stejných podmínek měření, jako

$$r(x_i, x_j) = \frac{n \sum_{k=1}^n x_{ik} x_{jk} - \sum_{k=1}^n x_{ik} \sum_{k=1}^n x_{jk}}{\sqrt{\left[ n \sum_{k=1}^n x_{ik}^2 - \left( \sum_{k=1}^n x_{ik} \right)^2 \right] \left[ n \sum_{k=1}^n x_{jk}^2 - \left( \sum_{k=1}^n x_{jk} \right)^2 \right]}} \quad (2.25)$$

Pokud korelace mezi vstupními veličinami existuje a má významné hodnoty, tak nemůže být v žádném případě zanedbána. Přidružené kovariance by měly být určeny

experimentálně, je-li to proveditelné změnou korelovaných vstupních veličin nebo užitím dostupných informací. Pohled založený na zkušenostech a všeobecných znalostech je zvláště vyžadován, pokud odhadnutý stupeň korelace mezi vstupními veličinami vzniká jako výsledek obecných vlivů, jako např. teplota okolí, atmosférický tlak a vlhkost. V mnoha případech mají naštěstí výsledky takových vlivů zanedbatelnou vzájemnou závislost a ovlivňované vstupní veličiny mohou být považovány za nekorelované. Dalším způsobem jak se vypořádat s obecnými vlivy, je jejich zahrnutí do výpočtu, pomocí dalších nezávislých vstupních veličin (zpracováno dle [25]).

### 2.1.7 Rozšířená nejistota

Všechny doposud zmíněné nejistoty nějak souvisely s odhadem směrodatné odchylky. V případě nejistoty typu B se výpočet nejistoty konstruuje tak, aby výsledek směrodatné odchylce odpovídal. To může být obtížné, ale ne nepřekonatelné. Z toho vyplývá, že výsledná standardní kombinovaná nejistota bude mít charakter směrodatné odchylky. Pokud bychom měli vyjádřit, s jakou pravděpodobností tento interval pokrývá hodnotu měřené veličiny, tak je to vzhledem k definici směrodatné odchylky normálního rozdělení 68,33 %. Vzhledem k tomu, že standardní kombinovaná nejistota je tedy na určité konfidenční hladině, mohla by se univerzálně používat pro vyjádření nejistoty výsledku měření. V praxi se ale vyžaduje spolehlivost vyjádření nejistoty na 95, 99 či více procent. Vysoké hladiny pravděpodobnosti jsou dnes vyžadovány jak ve výzkumu, tak i v průmyslové výrobě a obchodu. Samozřejmostí jsou u aplikací, kde může být ohroženo bezpečí a zdraví lidí. Vyjadřovat nejistotu měření v těchto případech na vyšší konfidenční hladině, bylo doporučováno již v roce 1980 doporučením INC-1 [27], které vydala Pracovní skupina pro vyjadřování nejistot, sestavená organizací BIMP. Toto doporučení bylo v roce 1981 potvrzeno organizací CIMP v dokumentu CI-1981 [28] a znovu potvrzeno v roce 1986 toutéž organizací v dokumentu CI-1986 [29].

Zdálo by se, že nejistotu která leží na požadované pravděpodobnostní hladině, tedy tzv. *rozšířenou nejistotu*  $U$ , spočítáme triviálně ze standardní kombinované nejistoty  $u_c$ , pomocí vynásobení příslušným koeficientem normálního rozdělení.

U rozšířené nejistoty se rozšiřující koeficient označuje, jako tzv. *koeficient krytí*  $k$ , a výpočet  $U$  je tedy následující:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.26)$$

Problémem ale je, že koeficient krytí ve skutečnosti není roven koeficientu normálního rozložení, takže nemůžeme bez jakékoliv další analýzy prohlásit, že  $k = 2$  pro 95,45 % a  $k = 3$  pro 99,73 %. Nejistota měření totiž není, jak již bylo zmíněno, vyjádřením standardní odchylky, nýbrž pouze jejím odhadem. Prakticky to znamená, že můžeme hovořit o tzv. *nejistotě nejistoty*. Například u nejistoty typu A je zřejmé, že když provedeme znovu příslušný počet měření, tak obdržíme pokaždé trochu jinou nejistotu. Větší soubor těchto nejistot by pak mohl být podkladem pro výpočet zmiňované nejistoty nejistoty. V praxi se tento problém řeší za pomoci Studentova rozdělení pravděpodobnosti, a koeficient krytí se pak spočítá jako koeficient Studentova rozdělení

$$U_p = k_p u_c(y) \approx t_p(\nu) u_c(y) \quad (2.27)$$

Rozšířená nejistota pak určuje interval  $Y = y \pm U_p$ , který má přibližnou úroveň konfidence  $p$  [25]. Při použití rovnice (2.27) musíme být opatrní při dosazování Studentova koeficientu, protože konfidenční úroveň zpravidla nesouhlasí s pravděpodobností

uvedenou v tabulce Studentova rozdělení. Koeficient krytí na konfidenční úrovni  $p$  odpovídá t-koeficientu s kvantilem  $1 - \alpha$ . Příklad: jestliže je požadovaná konfidenční úroveň 95 % a máme 30 stupňů volnosti, tak  $k_{0,95} = t_{0,975}(30) \approx 2,042270353$ .

Koeficienty Studentova rozdělení  $t_p(\nu)$  jsou tedy tabelovány pro příslušné stupně volnosti  $\nu$  a konfidenční úrovně. Tyto úrovně bývají také označovány jako úrovně pravděpodobnosti či úroveň confidence. V této práci jsou použity všechny tři termíny. Existují námitky, že konfidenční interval a konfidenční úroveň jsou jasně definované statistické pojmy a používat je v souvislosti s nejistotou měření je nesprávné. Na druhé straně striktní rozlišování mezi konfidenční úrovní a úrovní confidence sice termíny pro statistiky odliší, ale i v odborné praxi bude přesto docházet k záměnám. V této práci, stejně jako v mnoha dalších publikacích znamená úroveň confidence i konfidenční úroveň hladinu pravděpodobnosti, se kterou leží v intervalu určeném nejistotou hodnota měřené veličiny. Otázka je ale otevřená a v budoucnu možná převládne používání jednoho termínu, ať již s dovětkem hladina, či úroveň. Základním problémem ale samozřejmě není usus v oblasti pojmenování konfidenční hladiny, ale určení již zmiňovaných stupňů volnosti. Předpokladem správného vyjadřování nejistoty je přiřazení stupňů volnosti každé složce výsledné kombinované nejistoty. U nejistoty typu A je situace relativně jednoduchá, protože ve většině případů se bude počet stupňů volnosti roven počtu nezávislých opakování méně jedna, tedy  $\nu = n - 1$ .

Toto platí pouze pro jednoduchou veličinu odhadnutou aritmetickým průměrem z  $n$  nezávislých pozorování. Je-li  $n$  nezávislých pozorování užito pro stanovení přímky metodou nejmenších čtverců, je počet stupňů volnosti  $\nu$  roven  $n-2$ . Pro metodu nejmenších čtverců o  $m_p$  parametrech a  $n$  dat je počet stupňů volnosti v roven  $n-m_p$  [25].

U nejistoty typu B je situace mnohem složitější, protože stanovit míru pochybnosti o těchto složkách je krajně obtížné. Je rozšířenou praxí uvažovat stupně volnosti nejistoty typu B jako nekonečné, což odpovídá i doporučení některých dokumentů, např. [30]. Tento postup, ale dle mého názoru nelze plošně používat, protože u nejistoty typu B stanovených z minima informací, či expertních odhadů je míra pochybnosti ve skutečnosti ještě vyšší, než je tomu u nejistoty typu A. Tento fakt by se měl odrazit i v nižších stupních volnosti. Problematika určování stupňů volnosti nejistoty typu B je podrobněji rozvedena v kapitole 3.1.6.1.

Pakliže je problém stanovení stupňů volnosti pro nejistotu typu A i B vyřešen, zbývá ještě vypočítat tyto stupně pro standardní kombinovanou nejistotu. Máme-li pro každou složku nejistoty určené stupně volnosti, musíme při výpočtu celkových, tzv. *efektivních stupňů volnosti* reflektovat, jak se která složka podílí na výsledné nejistotě. Pokud má některá složka velice nízké, či naopak vysoké stupně volnosti a přitom se na výsledné nejistotě skoro nepodílí, tak i vliv těchto stupňů volnosti bude minimální, ne-li zanedbatelný. Podle [4] je pro výpočet efektivních stupňů volnosti  $\nu_{ef}$  doporučen tzv. *Welch-Satterthwaitův vztah*. Podle něj se efektivní stupně volnosti  $\nu_{ef}$  vypočítají jako

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}, \text{ kde } \nu_{ef} \leq \sum_{i=1}^N \nu_i. \quad (2.28)$$

Ani tento vztah však není bez problému, zaprvé je pouze aproximační a zadruhé nefunguje při příliš malých stupních volnosti. V praxi se často vztah (2.28) vůbec nepočítá a často se rovnou uvažuje  $k = 2$  pro 95% úroveň confidence a  $k = 3$  pro 99% úroveň



konfidence. Možností tohoto zjednodušení a použitelností Welch-Satterthwaitova vztahu se budu dále zabývat v kapitole 3.1.6.2.

Pokud jsme překonali všechny nástrahy vyjadřování nejistoty, a úspěšně jsme dospěli až k tomuto bodu, máme vypočtenou rozšířenou nejistotu měření. Z předchozího textu vyplývá, že je to interval, který lze přímo použít pro posuzování shody, což bylo rozebráno v kapitole 2.1.2. Máme tedy k dispozici odhad hodnoty měřené veličiny  $y$  a rozšířenou nejistotu tohoto odhadu  $U_p$ . Tento výsledek měření se obvykle zapisuje  $Y = y \pm U$ , což znamená, že od intervalu  $y - U$  do  $y + U$  je možné očekávat, že obklopuje velkou část rozdělení hodnot, které mohou být přiměřeně přisouzeny výstupní veličině  $Y$ . Takový interval se pak zapisuje jako:

$$y - U \leq Y \leq y + U. \quad (2.29)$$

Rozšířená nejistota  $U$  je tedy chápána tak, že definuje interval okolo výsledku měření, a o tomto intervalu se předpokládá, že obklopuje velkou část  $p$  rozdělení pravděpodobnosti charakterizovaného výsledkem a jeho kombinovanou standardní nejistotou, a  $p$  je pravděpodobnost krytí nebo úroveň konfidence intervalu [25].

Ve starší literatuře se většinou doporučuje, aby byla konfidence  $p$  spojená s intervalem definovaným  $U$  odhadnuta a uvedena, kdykoliv je to možné. V současné době je to již standardem. Uvádět rozšířenou nejistotu bez konfidenční hladiny totiž nemá smysl. Nejdůležitější je vždy dobře chápat smysl rozšířené nejistoty měření a koeficientu krytí, protože bezmyšlenkovité násobení kombinované nejistoty  $u_c(y)$  předem danou konstantou neposkytuje žádnou novou informaci, a jenom podává kombinovanou nejistotu v odlišné formě.

Dále bychom si měli uvědomit, že v případech kdy se úroveň konfidence blíží 1, začínají hrát roli faktory, které se dříve nemusely brát v potaz. Pokud chceme dostat přiměřenou rozšířenou nejistotu na vyšších konfidenčních hladinách, tak se musíme zjednodušujících postupů vzdát. V současné době je snaha dosahovat u high-tech aplikací úrovně  $4\sigma$ , což odpovídá pravděpodobnosti 99,9936 %. Vyšší konfidenční hladiny se zatím nepoužívají, protože současné přístroje a hlavně současná metodika vyjadřování nejistot nedovoluje takových úrovní dosahovat, resp. není možno takové úrovně dosáhnout s rozumně velkou nejistotou měření.

### 2.1.8 Zapisování výsledku za pomoci nejistoty měření

Nedílnou součástí výpočtu nejistoty měření je její finální reprezentace v podobě jednoznačného zápisu. Hlavní zásady zapisování nejistoty vyplývají právě z požadavku na jednoznačnost a další použitelnost výsledku měření. Těmito hlavními zásadami jsou:

- zapsat výsledek tak, aby bylo jasné, které číslo je odhad měřené veličiny a které nejistota
- číselné údaje je třeba samozřejmě uvést včetně rozměrů veličin
- u nejistoty musí být vždy uvedeno, o jaký druh se jedná
- v případě rozšířené nejistoty musí být uvedena uvažovaná hladina pravděpodobnosti a použitý koeficient krytí
- nedílnou součástí výsledku je i případný slovní popis problémů, které při vyjadřování nejistoty vznikly a hlavně výčet zdrojů nejistoty, které se nepodařilo kvantifikovat, a přitom by mohly mít vliv na výslednou nejistotu měření.

Tyto zásady jsou velice důležité a bez jejich splnění není výsledek použitelný. Zejména je důležité dát pozor na uvedení koeficientu krytí a úrovně pravděpodobnosti

rozšířené nejistoty. Bez uvedení pravděpodobnosti tato nejistota nemá smysl a bez uvedení použitého koeficientu krytí nelze tuto nejistotu, a tedy i celý výsledek měření použít jako vstup pro další výpočty.

Správné zapisování celého výsledku měření včetně příslušné nejistoty je tedy pro celý postup vyjadřování nejistoty kritický. I proto je tato problematika zahrnuta do dokumentu [4] a do všech z něj vycházejících dokumentů (např. do [31]). Ačkoliv je forma a množství uváděných informací závislá na zamýšleném použití výsledku měření, tak bývá vždy doporučováno uvádět maximum informací i za cenu jejich nadbytečnosti. Protože je ale výsledek měření často předmětem obchodu, tak bývá praxe spíše opačná. Uvádí se minimum informací, aby se neodhalovalo know-how, a zákazník nedostane informaci, za kterou si nezaplatí. I z tohoto důvodu jsou v [4] definována jasná pravidla, jak je třeba výsledek měření uvádět. Některá jsou povinná – ta zaručují jednoznačnost nejistoty měření a jiná jsou doporučena – ta pomáhají zprůhlednit celý proces měření a výpočtu. Protože jsou standardy v oblasti nejistoty převzaty z anglických originálů (jinak to ani v případě předpisů, které mají být stejné všude na světě, není možné), tak nastává problém s interpretací anglického slovesa „should“. V překladu to znamená „měl by“. Toto sloveso se v dokumentech ISO používá velice často. Pak to působí, jakoby většina částí normy nebyla pro její celkové naplnění závazná. V praxi splnění normy posuzuje strana, která nakonec naplnění podmínek kontroluje. V případě akreditované laboratoře je to příslušný autorizovaný orgán. Pak se z frází typu „mělo by být zajištěno“ stává „musí být zajištěno, a pakliže nebude, tak musí být uvedeny pádné důvody, proč nebylo zajištěno“.

Dle [4] „bychom měli“:

- jasně popsat metodu použitou pro výpočet výsledku měření a jeho nejistoty z experimentálních měření a vstupních dat
- vypsat seznam všech složek nejistoty, které uvažujeme, a plně dokumentovat, jak byly určeny
- prezentovat analýzy dat tak, že každý z důležitých kroků může být snadno zopakován, výpočet zapsaného výsledku tedy může být nezávisle opakován, je-li to nutné
- uvést všechny korekce a konstanty použité v analýze a jejich zdroje

Když popisujeme výsledek měření, a když mírou nejistoty je kombinovaná standardní nejistota  $u_c(y)$ , měli bychom:

- uvést úplný popis, jak je výstupní veličina  $Y$  definována
- uvést odhad  $y$  výstupní veličiny  $Y$  a jeho kombinovanou standardní nejistotu  $u_c(y)$ ; jednotky  $y$  a  $u_c(y)$  by měly být vždy uvedeny
- zahrnout relativní kombinovanou standardní nejistotu  $u_c(y) / |y|$ ,  $|y| \neq 0$  když je to vhodné

Je-li to pokládáno za užitečné pro předpokládané uživatele výsledku měření, například pro pomoc při budoucích výpočtech koeficientů krytí nebo pro pomoc při porozumění měření, měli bychom dále uvádět:

- odhad efektivního stupně volnosti  $\nu_{ef}$
- Typ A a Typ B kombinovaných standardních nejistot  $u_{cA}(y)$  a  $u_{cB}(y)$  a jejich odhadnuté efektivní stupně volnosti  $\nu_{ef}(u_{cA}(y))$  a  $\nu_{ef}(u_{cB}(y))$

Je-li je mírou nejistoty  $u_c(y)$ , je dle [4] výhodné uvést výsledek měření jedním ze čtyř následujících způsobů:

- a)  $m_s = 100,021\ 47\ \text{g s}$  (kombinovanou standardní nejistotou)  $u_c = 0,35\ \text{mg}$ .

- b)  $m_S = 100,021\ 47\ (35)\ \text{g}$ , kde číslo v závorce je numerická hodnota (kombinované standardní nejistoty)  $u_c$  vztahující se k odpovídající poslední číslici uvedeného výsledku.
- c)  $m_S = 100,021\ 47\ (0,000\ 35)\ \text{g}$ , kde číslo v závorce je numerická hodnota (kombinované standardní nejistoty)  $u_c$  vyjádřená v jednotce uvedeného výsledku.
- d)  $m_S = (100,021\ 47 \pm 0,00035)\ \text{g}$ , kde číslo za symbolem  $\pm$  je numerická hodnota kombinované standardní nejistoty  $u_c$  a ne konfidenční interval.

S tím, že způsobu č. 4 bychom se měli vyvarovat, protože hrozí záměna s chybou měření či rozšířenou nejistotou. Tradičně totiž bývá zápis se symbolem  $\pm$  považován za interval s vysokou úrovní konfidence. Uvedený příklad se týká vyjádření měření nominálního 100 g standardu hmotnosti  $m_S$ . Slova v závorkách mohou být pro stručnost vynechána, je-li  $u_c$  v technické zprávě někde jinde definováno.

Když je mírou nejistoty rozšířená nejistota  $U$ , měli bychom dle [4]:

- uvést úplný popis, jak je výstupní veličina  $Y$  definována
- uvést výsledek měření ve tvaru  $Y = y \pm U$  a udat jednotky  $y$  a  $U$
- zahrnout relativní rozšířenou nejistotu  $U / |y|$ ,  $|y| \neq 0$ , když je to vhodné
- uvést hodnotu  $k$  užitou k získání  $U$  (nebo pro výhodnost užití výsledku uvést  $k$  a  $u_c(y)$ )
- uvést přibližnou úroveň konfidence spojenou s intervalem  $y \pm U$  a uvést, jak byla určena

Doporučený zápis je pak:

$m_S = (100,021\ 47 \pm 0,000\ 79)\ \text{g}$ , kde číslo za symbolem  $\pm$  je numerická hodnota (rozšířené nejistoty)  $U = k \cdot u_c$ , s  $U$  určeným z (kombinované standardní nejistoty)  $u_c = 0,35\ \text{mg}$  a (koeficientu krytí)  $k = 2,26$  založeném na t-rozložení pro  $\nu = 9$  stupňů volnosti a definovaný odhadnutý interval s úrovní konfidence 95 %.

Takto komplikovaný zápis může být sice jednoznačný, ale mnohdy nepřehledný, proto je lepší uvádět výsledky, kterých je zpravidla více, formou tabulky, ve které je jasně specifikována rozšířená nejistota  $U$  a použitý koeficient krytí. Nezbytné je také uvést také uvažovanou úroveň pravděpodobnosti. Vhodné je uvést tento údaj do hlavičky či do zápatí tabulky. V praxi se také často používá zápis pravděpodobnosti jako indexu rozšířené nejistoty, tedy  $U_p$  (např.  $U_{95}$ ), kde se index uvádí v procentech. Příkladem takového zápisu je následující Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Příklad zápisu výsledku pomocí rozšířené nejistoty

označení vzorku	hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$U_{95}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$k$ (-)
NBT00562	2353,43	21,29	2
NBT00563	2411,72	23,31	2
NBT00564	2311,31	21,14	2

kde  $U_{95}$  je rozšířená nejistota s pravděpodobnostní úrovní 95 % a  $k$  je koeficient krytí

Problematická je otázka zaokrouhlování a otázka počtu platných desetinných míst, které se u rozšířené nejistoty uvádí. Dle [26] musí být číselná hodnota nejistoty měření uváděna na nejvýše dvě platné cifry. To má své opodstatnění, protože další desetinná místa nemají prakticky žádnou vypovídací hodnotu. Uvedeme-li například, že  $U = 26,1254851114556624123$ , tak je jasné, že:

- velká část uvedených cifer nemá při posuzování shody intervalu  $U \pm y$  a požadovaných tolerančních mezí žádný vliv.
- většina uvedených číslic je jenom „odpadem“ z výpočtu a nemají žádnou vypovídací hodnotu. To znamená, že nikdo by se při použité metodice měření a použitých přístrojích nepodepsal pod výrok, že na pátém desetinném místě rozšířené nejistoty bude číslice 8.

Problém má ale také druhou stranu mince. Pokud bude například číslice na třetím platném desetinném místě rozšířené nejistoty významná v poměru k odhadu hodnoty výstupní veličiny, a zároveň bude toto číslice opodstatněná vzhledem k přesné měřicí metodě, tak je rozumné zapsat rozšířenou nejistotu na tři platná desetinná místa. To je ale v rozporu s dokumentem [26] a proto logická úvaha o opodstatněném uvádění nejistoty na větší počet desetinných míst v praxi často neobstojí.

U zaokrouhlování je situace jednodušší, tam je doporučení [26] plně v souladu se smyslem nejistoty dle [4]. V případě nejistoty se zaokrouhluje klasicky (dle přílohy B, části 0 dokumentu [1]), pouze v případě, kdy by za zaokrouhlování vedlo ke snížení hodnoty nejistoty o více než 5%, je třeba použít zaokrouhlení nahoru. Někteří autoři [25] doporučují pro zvýšení konfidence výsledné nejistoty zaokrouhlovat nahoru ve většině případů, a směrem dolů zaokrouhlovat pouze, sníží-li se tím nejistota minimálně (v řádu desetin procenta).

### **2.1.9 Shrnutí problémů při vyjadřování nejistoty měření**

Analýza provedená v předcházejících kapitolách odhalila několik bodů při vyjadřování nejistoty, při kterých mohou vzniknout problémy. Problémy jsou přitom myšleny komplikace takového charakteru, které mohou způsobit to, že výsledná vypočítaná nejistota nebude odpovídat skutečné přesnosti měření. Odhalená úskalí jsou:

- identifikace všech podstatných zdrojů nejistoty měření (problém spočívá v systematickém určování zdrojů, které jsou specifické pro různá měření)
- volba správného předpokladu rozložení pravděpodobnosti pro výpočet složek nejistoty typu A (problém spočívá v odhadu rozložení z omezeného souboru dat, a také v metodickém zařazení odhadu rozložení do procesu výpočtu nejistoty měření)
- stanovení nejistoty typu B (protože složky nejistoty typu B jsou „všechny složky, které nejsou typu A“, tak je spektrum problémů, které mohou vzniknout široké. V podstatě se musí pro každou složku stanovit metoda, jakou nejistota odhadne)
- stanovení počtů stupňů volnosti pro složky nejistoty typu B (stanovení stupňů volnosti je problém, protože při zvolené metodě se může zdát, že je nekonečné, ale přitom můžeme jinou metodou dospět k úplně jiné nejistotě a stupně volnosti by tedy měly být malé)
- odhalení významné korelace a její správné zahrnutí do výpočtu nejistoty měření (problém vzniká při stanovení míry a způsobu korelace. Korelace totiž nemusí být lineární a také se často stává, že je dostatek dat vstupních veličin, ale není možné určit, které dvojice hodnot spolu souvisejí. Vzniká také otázka, jak rozpoznat nelineární korelace zahrnout do výpočtu nejistoty)
- správné stanovení kombinované nejistoty měření (kromě zmíněného problému s korelacemi vstupních veličin existuje také otázka, zda je dostatečný vztah s derivacemi prvního řádu)
- stanovení rozšířené nejistoty tak, aby výsledný interval  $U \pm y$  obsahoval pravou hodnotu měřené veličiny opravdu s požadovanou pravděpodobností (je třeba

správně stanovit koeficient krytí, to znamená stanovit efektivní stupně volnosti kombinované nejistoty)

Počet problematických bodů a jejich závažnost záleží samozřejmě na požadované úrovni přesnosti a použité měřicí metodice. Při měřeních, kde není vyžadována velká přesnost a kdy je použita přiměřeně přesná metoda měření, je vyjádření nejistoty dle [4] bez problému i za použití obecně doporučovaných aproximací. Obtížnost výpočtu nejistoty měření a hloubka s jakou je třeba analyzovat všechny kroky výpočtu, závisí zejména na požadované úrovni konfidence. V současných aplikacích se setkáváme s požadavky na 99,9% a vyšší konfidenční úroveň. V těchto případech je potřeba řešit všechny výše popsané problematické body. Neznamená to, že bez hlubší analýzy dostaneme vždy špatné výsledky. Obecný výpočet nejistoty je ve většině případů nastaven tak, aby při aproximacích docházelo pouze k nadhodnocení nejistoty. Při nadhodnocování bude výsledná nejistota vždy alespoň na požadované hladině konfidence. Výjimku tvoří zejména problém s efektivními stupni volnosti nejistoty typu B.

Právě v odstranění všech nadhodnocení při výpočtu nejistoty měření leží cesta, jak dosáhnout vysokých hladin konfidence s relativně nízkou nejistotou měření. Nemůžeme-li zpřesnit použitou metodu měření, můžeme zpřesnit výpočet nejistoty.

Kritikou této idey může být obava z podhodnocení nejistoty. V praxi se nadhodnocování nepoužívá nejenom proto, aby se významně zjednodušil výpočet nejistoty měření, ale také proto, že při nedostatečné analýze zdrojů nejistot je obava z neidentifikovaných zdrojů. Ale je třeba si uvědomit, že takovéto počítání „na jistotu“ nemusí vůbec zaručit důvěryhodný výsledek. Identifikování zdrojů nejistoty a jejich kvantifikace je kritický krok, a pokud není proveden správně, postrádá vypočítaná nejistota smysl. Cesta do budoucna je tedy spíše v lepší znalosti o procesech, které ovlivňují přesnost měření a jejich matematickém popisu, než-li v obecných doporučeních, které mohou konfidenční úroveň v řadě případů zajistit.

Jak už bylo ale několikrát uvedeno, vše závisí na aplikaci. Náklady na stanovení nejistoty mohou být podstatnou položkou v celkových nákladech na měření. Pokud jsou přesné a spolehlivé výsledky potřeba, tak jich nelze bez vynaložených prostředků dosáhnout. Naopak ale není nutné vynakládat čas a peníze na přehnaně přesný odhad měřené veličiny, když tato přesnost potřeba není.

Při vyjadřování nejistoty měření je často největším problémem neochota personálu k hlubším analýzám. Matematická i praktická inženýrská stránka vyjadřování a zabezpečování nejistoty měření je komplikovaná záležitost. V současné době bohužel nelze poptávku po jednoduché a spolehlivé metodice vyjadřování přesnosti uspokojit, protože hodnota měřené veličiny je prostě neznámá a my se pouze snažíme odhadnout, jaká by mohla být. S čím větší přesností chceme odhad učinit, tím je měření a výpočet nejistoty složitější. Moderní měřicí přístroje a propracované výpočetní metody zahrnující výpočet nejistoty měření, nám pomáhají přiblížit se k pravé hodnotě měřené veličiny. Míra možného přiblížení stále stoupá, ale pokud přijmeme fakt, že pravá hodnota měřené veličiny je ve své podstatě neurčitelná, tak si musíme uvědomit, že úkol zajišťování větší a větší přesnosti měření bude do budoucna stále více náročnější. V současné době není v dohledu žádná obecná metoda k jednoznačnému určení hodnoty měřené veličiny. Vývoj se ubírá spíše cestou specializace, a proto je třeba specializovat i metodu výpočtu nejistoty měření. Tento požadavek je spolu s požadavkem na přenositelnost a jednoznačnost nejistoty jednou z velkých výzev do budoucna.

## 2.2 Kalibrační intervaly

V základním přehledu definic v kap. 1.2 již bylo řečeno, že kalibrace je proces porovnávání měřicího přístroje s etalonem. Výsledkem kalibrace je tedy zjištění vztahu mezi hodnotami vykazovanými přístrojem a mezi hodnotami příslušejícími měřicímu standardu. Kalibrace se musí provádět, protože každý parametr měřicího vybavení se s časem mění, a k zajištění správnosti a přesnosti výsledku je třeba získat informace o této změně.

Aby se zajistila spolehlivost přesnosti výsledků kalibrace, musí mít kalibrace prokazatelnou návaznost. To znamená, že všechny výsledky spojené s kalibrací musí být navázané na etalony národních metrologických institutů, pomocí nepřerušného řetězce porovnávání, kde každé měření má vyjádřenou nejistotu měření. Musí být také zajištěno použití správných postupů a přístrojů, a kalibraci musí provádět školený personál v odpovídajících podmínkách. Cílem mezinárodního metrologického systému je plně uplatnit tento koncept návaznosti a sjednotit tak různé státní metodiky tak, aby výsledky měření byly jednoznačné a komunikace s jakýmkoliv zákazníkem byla naprosto jasná. Bohužel je stále mnoho oblastí, kde tato myšlenka čeká na realizaci.

Kalibrovat měřicí zařízení je třeba nehledě na to, zda se jedná o jednoduché zařízení, či komplikovaný měřicí přístroj, protože jedině kalibrací, popřípadě ověřováním, se dá prokázat způsobilost těchto zařízení k měření. Je třeba zdůraznit, že u komplikovaných měřicích celků se musí kalibrovat celý systém, včetně veškerého hardwaru a softwaru, který má vliv na výsledek měření.

Zásadním problémem je stanovit, s jakou frekvencí je třeba kalibraci provádět. Prakticky všechny přístroje, jakkoliv jsou jednoduché, mění své vlastnosti s časem a potíží je v tom, že zpočátku nevíme, jak rychle a jak významně se tyto vlastnosti mění. U měřicích přístrojů, zejména nových, se kalibrační intervaly určují podle stejného nebo podobného typu přístroje, ale je třeba mít na paměti, že v tomto případě je třeba vždy počítat se zvýšenou nejistotou měření, dokud nebudou k dispozici skutečná data z kalibrační historie daného měřicího vybavení.

Hlavním faktorem, který určuje, jak často se kalibrace bude provádět, je požadovaná přesnost měření. Pokud je nejistota kalibrace podstatně menší než požadovaná nejistota měření, a je-li známa závislost růstu nejistoty na čase, mohou být určeny velmi dlouhé kalibrační intervaly v řádu několika let. Pakliže se ale nejistota kalibrace blíží nejistotě požadované, tak je třeba kalibrační intervaly podstatně zkrátit. V praxi se tedy mohou vyskytnout kalibrační intervaly v intervalu od několika minut do pěti a více let.

Přes jasnou potřebu pravidelné kalibrace pro zajištění hodnověrnosti výsledku měření je stále mnoho komerčních subjektů, které nutnost kalibrace pro správnost a přesnost měření popírají. Jejich nesprávná argumentace spočívá v tom, že přístroje mají garantovanou přesnost od výrobce a pokud to není výslovně uvedeno, tak ji není třeba v pravidelných intervalech ověřovat. To ale není pravda, protože na informace poskytované výrobcem měřicího vybavení se zpravidla nedá spoléhat. Výsledek měření založený na těchto údajích může být chybný a to jak v odhadu hodnoty měřené veličiny, tak také ve vyjádřené nejistotě měření. Určitá možnost použití nekalibrovaného měřicího vybavení je pouze pro informativní měření, kdy přesnost měření nemá žádný vliv na proces, který se měřením zajišťuje. I v těchto případech je však potřeba zajistit správnost měření.

K neochotě kalibrovat měřicí vybavení v pravidelných intervalech přispívají zejména vysoké náklady spojené s kalibrací. Musíme si ale také uvědomit, že s nekalibrovaným

vybavením jsou spojená rizika a skryté náklady. Může se například zhoršit jakost celé výroby a tím docházet ke ztrátám, případně i k odmítnutí celé dodávky. Pravidelná kalibrace pomáhá předcházet vzniku havárií a výsledná cena za likvidaci havárie bývá zpravidla mnohem větší než cena kalibrace. Při haváriích dochází také často ke ztrátám na lidských životech a zdraví. Z toho vyplývá, že kalibrace není důležitá jenom z hlediska technického a ekonomického, ale také z hlediska bezpečnostního.

### 2.2.1 Požadavky na kalibraci

Kalibrační měření je v principu stejné jako každé jiné měření, přesto jej lze určitým způsobem považovat za samostatnou oblast. Liší se specifickým účelem, ze kterého vyplývají speciální požadavky, zejména na přesnost a správnost provedení měření. Také legislativa rozlišuje zkušební a kalibrační laboratoře. Oddělit požadavky na kalibrační laboratoře od obecných požadavků na zkušební laboratoře je ale obtížné.

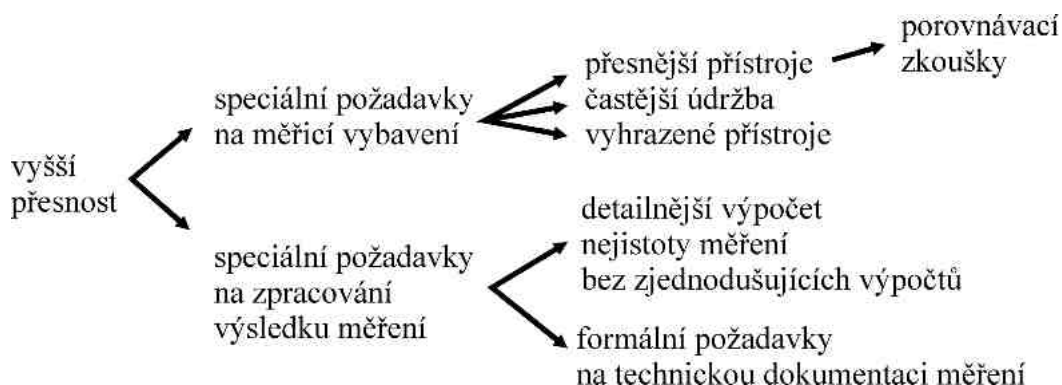
Požadavky na kalibrační laboratoř a na kalibrační měření jsou specifikovány v [10] a [11]. Naplnění požadavků těchto předpisů je nutné ve všech případech kdy má mít výsledek měření legislativní váhu. Tudiž každé středisko kalibrační služby musí požadavky standardů [10] a [11] splňovat.

Nejedná se jenom o povinnost, ale o to, že splnění těchto požadavků je v současné době nejlepším způsobem pro systematické zajišťování jakosti měření. V praxi se také často uplatňuje rozšíření a zpřesnění požadavků dalšími národními, vojenskými či firemními standardy, které reflektují specifika konkrétních metod měření. Důležité je vždy to, co vyžaduje zákazník. V současné době je to zejména řízení jakosti podle ISO 9000.

Nutno podotknout, že požadavky na kalibraci nejsou jenom předmětem technických standardů, ale také právních předpisů. Konkrétně v §11 odst. 5 zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii [32] je uvedeno, že jednotnost a správnost pracovních měřidel zajišťuje v potřebném rozsahu jejich uživatel kalibrací, není-li pro dané měřidlo vhodnější způsob či metoda.

#### 2.2.1.1 Technické požadavky na kalibrační měření

Již bylo zmíněno, že kalibrační měření se od běžného měření odlišuje zejména požadavky na přesnost. Kalibrační měření bývají zpravidla o řád či dva přesnější. Z požadavku na přesnost vyplývají požadavky další. Situaci přehledně shrnuje následující Obr. 7.



Obr. 7: Požadavky na kalibrační měření

Dosáhnout o řád přesnějšího měření, než jakým disponuje kalibrované vybavení, je obtížný úkol, zejména v případech, kdy kalibrované vybavení dosahuje samo o sobě

vysoké úrovně přesnosti. V kalibračních laboratořích se tedy používá velice přesných přístrojů na úrovni současných technických možností. Používané přístroje často není možné poslat nikam na kalibraci, protože za a) neexistují přesnější přístroje a za b) manipulace na úrovni transportu měřidla není v některých případech přípustná. Proto je nutné pro ověřování metrologických charakteristik měřidla používat tzv. *kruhové zkoušky* nebo jiné formy porovnávacích zkoušek, při kterých si navzájem vyměňují záznamy o kalibracích jednoho a téhož etalonu. *Mezilaboratorní porovnávací zkoušky* jsou obsáhlou a samostatnou oblastí vzhledem k jejich formální a technické náročnosti, a nebudou v této práci dále rozebírány. Bližší informace o kruhových zkouškách lze nalézt například v [33]. Dle tohoto informativního dokumentu se postupy mezilaboratorních porovnávacích zkoušek řídí podle těchto norem a návodů: [31], [34], [35], [36], [37] a [38].

Nejde jen o ověřování metrologických charakteristik, protože důraz při zjišťování přesnosti přístroje je kladen také do oblasti prevence. Stabilitu metrologických charakteristik kalibračního přístroje je možno zajistit důkladnou údržbou a provozem za speciálních podmínek. Z toho vyplývá, že kalibrační přístroje nelze používat k jiným než kalibračním účelům, protože každé další jiné použití by zvýšilo riziko ztráty nominální přesnosti přístroje.

U kalibračních měření je základním předpokladem navázanost měření na mezinárodní etalony. Vzhledem k tomu, že kvůli této důležitosti je návaznost kontrolovaná státem, bude tato problematika rozebrána v následující kapitole zabývající se legislativními požadavky.

Specifikum kalibračních měření neleží pouze v metodice měření a péči o přístrojové vybavení, odlišný může být také způsob výpočtu nejistoty měření. Při vyšších přesnostech je třeba obracet pozornost ke zdrojům nejistoty, které by při méně přesném měření byly zanedbatelné. Náročná je identifikace těchto zdrojů a i následné vyčíslení souvisejících nejistot. Naše pozornost se i více obrací na samotný proces výpočtu nejistoty, protože i ten je de facto dalším zdrojem nejistoty [20]. Proto je při kalibračních měřeních potřeba věnovat pozornost různým zjednodušením, která v sobě zahrnuje obecný postup výpočtu, doporučený dokumentem GUM [4]. Podrobněji bude tato problematika probírána v kap. 3.1.

Další oblastí, která je u kalibračního měření podstatná, je technická dokumentace měření. Obecně není v požadavcích na dokumentaci žádný rozdíl mezi zkušebními a kalibračními měřeními. Ale stejně jako vyšší požadavky na přesnost implikují vyšší požadavky na měření (tedy na přístroje, metodiku, pečlivost provedení, atd.), tak z účelu kalibračního měření vyplývají vyšší požadavky na dokumentaci. Výsledky kalibračního měření jsou totiž vždy podkladem pro další měření a tudíž je správné vyjádření výsledku a dokumentování postupu měření nezbytné.

#### 2.2.1.2 *Legislativní a normativní požadavky na kalibrační měření*

Z předchozí kapitoly vyplývá, že i když mezi kalibračními a zkušebními měřeními nalezneme odlišnosti, které pramení z požadavků na vyšší přesnost v případě kalibračních měření, tak v principu se tato měření nijak neliší. Z technického hlediska je kalibrace vlastně každé porovnávací měření. Z hlediska normativního již v některých detailech odlišný náhled nalezneme. V čem je ale největší rozdíl, to jsou požadavky legislativní. Zákon jasně rozeznává zkušební a kalibrační laboratoře. Konkrétně se jedná o zákon o metrologii [32] a o další vyhlášky, např. vyhláška o správnosti a jednotnosti měřidel [39].

Před rozбором legislativních požadavků se ale krátce zastavíme u požadavků normativních. Primární náplní této disertační práce sice není podrobná analýza



normativních předpisů, přesto je žádoucí se alespoň krátce zmínit o tom, jak na kalibrační měření pohlížejí mezinárodní standardy.

Předně jsou kalibrační měření v systému řízení kvality měření vyžadována. Dle [10] musí být navržena a zavedena metrologická confirmace, kterážto zahrnuje kalibraci a ověření měřicího vybavení. Na Obr. 13, který bude uveden v kap. 2.3.3 a který je dle [10] vytvořen, je vidět, že kalibrace tvoří vedle ověřování a případného opravného opatření, jednu ze stěžejních částí procesu metrologické confirmace.

Dále je kalibrace zmiňována v souvislosti s tím, že kalibrační interval může být podkladem pro výpočet intervalu confirmačního (podrobnosti budou uvedeny v kap. 2.3.3.1), či dokonce může tento interval přímo implikovat [40]. V části, kde [10] hovoří o záznamech je zmíněno, že záznamy by podle potřeby měly obsahovat údaje o nejistotě kalibrace. Dalším styčným bodem je vyžadovaná návaznost měření, s tím že návaznost se zajišťuje pomocí systému kalibračních laboratoří.

Zajímavé informace jsou obsaženy v příloze standardu [10], která je zaměřená na zákazníka a jeho metrologické požadavky. Jsou zde definovány dva pojmy, CMR – *metrologické požadavky zákazníka* a MEMC – *metrologické charakteristiky měřicího vybavení*. V souvislosti s MEMC je uveden popis kalibrace, vyzdvižen její význam a zdůrazněna důležitost její dokumentace. Dále je zde kalibrace nahlížena z procesního hlediska, kdy vstupy tvoří měřicí vybavení, etalony, pracovní postupy a podmínky prostředí; výstupem je pak výsledek, jehož součástí má být i nejistota měření.

Další standard [11], který je přímým podkladem pro posuzování způsobilosti zkušebních a kalibračních laboratoří, v podstatě mezi zkušebními a kalibračními laboratořemi nerozlišuje, povětšinou je použita formulace „zkuška a/nebo kalibrace“. Odděleně se pouze hovoří o nejistotě měření s tím, že oba typy laboratoří musí nejistotu vyjadřovat. U zkušební laboratoře jsou připuštěny určité úlevy v případech, kdy je vyjadřování nejistoty obtížné až nemožné. U kalibrační laboratoře se žádné výjimky z povinnosti vyjadřovat nejistotu měření nepřipouští.

Dále je potřeba u každého přístroje, který vyžaduje pravidelnou kalibraci uvádět informace o stavu kalibrace. To znamená datum poslední kalibrace, kdo kalibraci provedl a případně termín pro další kalibraci. Neznačená to, že kalibrační laboratoř by měla na přístroji uvést kalibrační interval. Ta by naopak žádná doporučení ohledně kalibračního intervalu dávat neměla. Vyznačení údaje se týká laboratoře, která přístroj používá. Tím by se mělo zamezit používání přístroje, který již nemusí splňovat kladené požadavky.

Jediným místem, kde standard [11] jasně rozlišuje mezi zkušebním a kalibrací je krátká podkapitola specifických požadavků. Zde je explicitně uvedeno, že kalibrační laboratoře musí být navázány na mezinárodní soustavu SI. Tudíž každé kalibrační měření musí být navázáno přímým či nepřímým měřením nepřerušným řetězcem kalibrací na primární etalony.

Plnění mezinárodních požadavků na kalibrační měření se v jednotlivých zemích zajišťuje národní legislativou. V české republice je to zejména skrze zákon o metrologii [32]. Jedná se hlavně o zmiňovanou návaznost měření. Z hlediska zákona se návazností myslí zařazení měřidla do nepřerušené posloupnosti přenosu hodnoty veličiny počínajícím *etalonem nejvyšší metrologické kvality*. Etalonem nejvyšší metrologické kvality se myslí *státní etalon*. Povinností státu je pak zajistit navázání těchto etalonů na etalony mezinárodní. Přenos hodnoty ze státních etalonů na tzv. *hlavní etalony* provádějí střediska kalibrační služby nebo Český metrologický institut. Ten může také kalibraci případně pouze zprostředkovat.

Další návaznost může pomocí hlavních etalonů stanovovat uživatel sám, či prostřednictvím ČMI, středisek kalibrační služby, nebo u jiných subjektů, které mají řádně navázaný hlavní etalon. Přípustné je též navázání na etalony zahraničních subjektů se srovnatelnou metrologickou úrovní. Podobu kalibrační značky stanoví vyhláška o jednotnosti a správnosti měřidel a měření [39].

U pracovních měřidel se provádí srovnávání s etalonem, popřípadě s certifikovaným referenčním materiálem. Může se použít i tzv. ostatní referenční materiál, ale vždy musí být dodrženy zásady návaznosti měřidel.

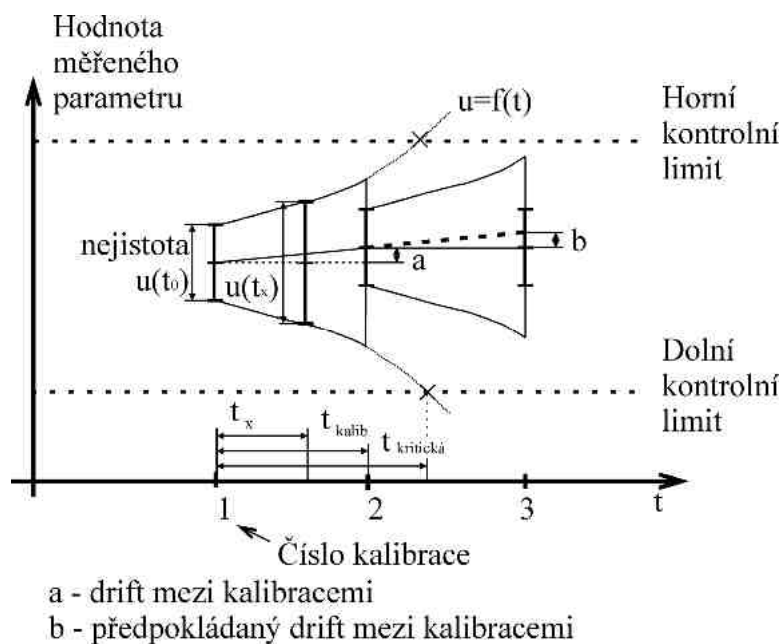
Dle [32] stanovuje střediska kalibrační služby úřad ÚNMZ, poté co žadatel prokáže způsobilost podle zákona č.22/97 Sb. o technických požadavcích na výrobky [41]. V tomto zákoně je definovaná státem zaštitěná akreditace. Konkrétní požadavky na kalibrační laboratoř, žádající o akreditaci, jsou definovány v technických standardech, zejména v této kapitole zmiňovaných [10] a [11].

### **2.2.2 Určování kalibračního intervalu**

V současnosti se pro určování kalibračního intervalu používají jak statistické, tak algoritmické metody. Statistické metody se pokoušejí řešit problém, jak udržet měřicí vybavení v mezích stanovených konfirmačními požadavky, resp. v mezích stanovených požadavky na přesnost a správnost výsledku měření tak, že se snaží najít takový kalibrační interval, který by odpovídal určité pravděpodobnosti, kdy výsledná nejistota zůstane v požadovaných mezích i na konci kalibračního intervalu. Statistické metody vyžadují data z rozsáhlé kalibrační historie, a proto se obtížně implementují do praxe. Na druhou stranu ve spojení s výpočetní technikou jsou statistické metody silným nástrojem pro určování kalibračních intervalů.

Algoritmické metody pracují většinou na principu rozhodování o zkrácení, či prodloužení kalibračního intervalu na základě naměřených údajů v průběhu kalibrace. Tyto metody mají v současné době široké uplatnění, ale také řadu nevýhod. Často je k dispozici tak malá kalibrační historie, že výsledky algoritmických metod lze považovat za náhodné. Algoritmické metody se nesnaží prozkoumat mechanismus růstu nejistoty a ani ho matematicky aproximovat, proto je problémem jednoznačně stanovit výslednou spolehlivost, což pak zpochybňuje samotné splnění požadavků metrologické konfirmace. Algoritmické metody také musí být používány zkušenými kalibračními technikami spíše než automatizovaným systémem. To zvyšuje ve většině případů provozní náklady.

Základní problém tkví v tom, že reálná měření nikdy neprovádíme v čase kalibrace, ale dlouho po ní. Jak už bylo napsáno výše, tak měřicí vybavení mění svoje vlastnosti s časem, to znamená, že nejistota vycházející z kalibrace platí pouze v čase kalibrace a pak zákonitě stoupá. Problémem je ale určit jak. Situaci objasňuje následující obrázek Obr. 8, na kterém jsou znázorněny tři kalibrace. Pokud značíme výslednou nejistotu první kalibrace  $u(t_0)$ , potom bude v každém okamžiku do další kalibrace předpokládaná nejistota  $u(t_x) < u(t_0)$ . Reálná změna nejistoty se zjistí až při dalším kalibračním měření.



Obr. 8: Role nejistoty a jejího růstu v procesu určování kalibračních intervalů

Pakliže budeme nejistotu považovat jako funkci času  $u = f(t)$ , tak podle průběhu této funkce můžeme předpokládat, kdy bude třeba měřicí vybavení znovu kalibrovat, aby byla dosažena požadovaná přesnost a spolehlivost měření. Pokud bychom dostatečně znali funkci  $f$ , není problém z nejistoty v čase kalibrace  $u(t_0)$  vypočítat nejistotu v aktuálním čase  $u(t_x)$ , cílem kalibrace je udržet nejistotu měření v požadavky definovaných hranicích, to znamená mezi horním a dolním kontrolním limitem. Předpokládaná nejistota  $u(t_x)$  se nesmí zaměřovat s nejistotou příslušejícímu přístroji v daném kalibračním intervalu. Nejistota která se přiřazuje přístroji je totiž rovna polovině intervalu <Horní kontrolní limit; Dolní kontrolní limit> a je to tedy nejistota, která je garantována volbou kalibračního intervalu v celé jeho délce. Jinými slovy, kalibrace slouží k udržení nejistoty v rámci požadovaných mezí.

Nemění se však jenom nejistota, ale i samotný odhad pravé hodnoty měřené veličiny. Z Obr. 8 je vidět, jak se může změnit tento odhad mezi kalibracemi. Z kalibrační historie můžeme vyzorovat určitý drift odhadu měřené hodnoty. Možnost takového posunu musíme zahrnout do předpokladu růstu výsledné nejistoty a v případech, kdy je průběh driftu dostatečně znám, je třeba o tento drift výsledný odhad očistit.

Takto postavený problém určování délky kalibračního intervalu vyžaduje odhad funkce  $f$ . Průběh nejistoty je různý případ od případu, a může být lineární, parabolický či jakýkoliv jiný. Stanovení odhadu této funkce je tedy velice obtížné. Nejjednodušší je situace, kdy máme k dispozici dostatek dat z předchozích kalibrací. Pesimistický předpoklad je sice takový, že míru růstu nejistoty nemůžeme bezpečně určovat ani z dostatečné kalibrační historie, protože kalibrace nám sice ověří výsledek, ale to nezaručuje, že stejně přesný je výsledek před i po této kalibraci. Také je pravda, že pokud je ve hře příliš neznámých vlivů, tak nejistota stoupá vždy a ani opakované ujištění o správnosti výsledku měření přístroje bezpečně nezaručuje spolehlivost a přesnost dalších měření. Takto postavené úvahy jsou v podstatě správné, protože stoprocentní jistotu prostě nemůžeme mít nikdy. Je tedy třeba začít počítat s počtem pravděpodobnosti, a podobně jako při výpočtu nejistoty měření či životnosti zařízení, půjde vždy o odhady na příslušné pravděpodobnostní hladině. Pak už nám bohatá kalibrační historie poslouží jako dostatečný údaj pro statistickou analýzu a odhad průběhu funkce  $f$ . V praxi ale často není dostatečná

kalibrační historie k dispozici a je třeba kalibrační interval nastavovat podle stejného nebo podobného typu přístroje. Z toho, že v případě nedostatku informací pro stanovení průběhu funkce  $f$  musíme předpokládat vyšší růst nejistoty, plyne, že musíme buď hodně zkrátit kalibrační interval, a tím zajistit přesný výsledek a zároveň tak nashromáždit dostatek dat pro další nastavování dalších kalibračních intervalů, nebo musíme zvednout výslednou nejistotu měření kalibrovaného přístroje. Je jasné, že pokud máme dva přístroje, kdy jeden z nich je nový a druhý starší s dostatkem kalibrační historie, že starší přístroj nemusí nutně a také asi nebude měřit, tak přesně jako nový. Ale zároveň také z předchozího textu vyplývá, že na výsledek měření nového přístroje se nemůžeme tolik spolehnout, takže při stejném kalibračním intervalu bude paradoxně nový přístroj měřit s mnohem větší nejistotou než přístroj starý.

Jestliže dobu, od které již není zaručena požadovaná nejistota měření, označíme stejně jako na Obr 8.  $t_{kritická}$ , tak doba příští kalibrace  $t_{kalib}$  musí být nutně  $t_{kalib} < t_{kritická}$ . Když kalibraci provedeme později, tak to neznamená, že v čase  $<t_{kritická}; t_{kalib}>$  nebude naměřená hodnota dostatečně přesná, ale znamená to, že v tomto intervalu nebude naměřená hodnota dostatečně spolehlivá. O kolik bude při správné volbě kalibračního intervalu  $t_{kalib}$  menší než  $t_{kritická}$  záleží na několika parametrech. Nejvýznamnějšími jsou doba a cena kalibrace. V praxi se volí kalibrační interval tak, aby se minimalizovaly náklady na kalibraci (čas, peníze, lidské zdroje) a je třeba také zahrnout logistiku, protože se musí počítat s dalšími náklady a prostoji, spojenými s kalibrací měřicího vybavení.

Nejdůležitější pro návrh kalibračních intervalů je ale stále, jak už bylo zmíněno výše, nejistota měření a její růst. Každá vstupní nejistota má jinou míru růstu, takže výsledná nejistota se může vypočítat pouze pomocí analýzy všech těchto vstupních nejistot. Po kalibraci se interval vyjadřující nejistotu většinou zmenší oproti předpokládané hodnotě, protože bereme v úvahu mnoho faktorů a změn, které vůbec nemusí nastat. Pakliže výsledkem kalibrace bude nejistota větší než předpokládaná, tak byl buď špatný předpoklad, nebo došlo k závažným změnám v měřicím vybavení. Je možné, že nejistota kalibrace bude blízká předpokládané hodnotě, to značí, že proběhla v podstatě nejhorší možná předpokládaná varianta. Mohou nastat i případy, kdy nepředpokládáme výrazný nárůst nejistoty, zejména když je frekvence kalibrací tak vysoká a měřicí vybavení tak stabilní, že v podstatě k žádnému výraznému růstu nejistoty nedochází. Takové případy se ale vyskytují řídce, protože kalibrace se kvůli finanční a časové náročnosti zpravidla neprovádí častěji, než je nutné, a proto i u dostatečně stabilního měřicího vybavení musíme předpokládat určitý nárůst nejistoty.

Vraťme se ale k průběhu funkce  $f$  z Obr 8. Nelze předpokládat, že tento průběh získaný a ověřovaný kalibračním procesem zůstane konstantní, protože na něj působí řada vlivů jako je například skladování, kvalifikace obsluhy a zatěžování měřicího vybavení. Jedním z nejdůležitějších faktorů je stárnutí, a tedy i frekvence užívání měřicího vybavení. U měřicího vybavení dochází totiž časem k změně metrologických charakteristik, která bývá zapříčiněna především užíváním, a tedy frekvence užívání má vliv na růst nejistoty v čase. Proto je třeba dbát na to, aby se změněná frekvence užívání promítla do délky kalibračního intervalu. Z toho je vidět, že i ostatní složky konfirmačního systému jsou velice důležité a přímo se podílejí na výsledné nejistotě měření. Pokud by nebylo definováno a zajišťováno nakládání s měřicími přístroji, tak by se funkce  $f$  mohla nepředvídatelně měnit a tudíž ani pravidelná kalibrace by nemohla zajistit výsledek s požadovanou nejistotou

V pozadí všech těchto úvah je třeba si stále uvědomovat, že ani správně navrhnutý a realizovaný konfirmační systém, jehož součástí bude v dostatečných intervalech správně

provedená kalibrace, nezaručuje správný výsledek měření. Konfirmační systém pouze zajišťuje minimalizaci rizika špatného výsledku měření na únosnou míru.

### 2.2.2.1 *Určování kalibračních intervalů – jako proces*

Problém nastavení kalibračního intervalu může být velice složitý, ale přesto může být vyřešen, a to jak pomocí statistického řízení procesu měření, tak inženýrskou analýzou. Je ale otázkou, jak popsat a zabezpečit proces určování kalibračních intervalů samotný. Kdybychom měli k dispozici dobře známý postup nastavování kalibračních intervalů s minimem lidského vlivu, mohli bychom získávat velice kvalitní výsledky s nižšími náklady na kalibraci samotnou.

Analýzu kalibračních intervalů lze dle [16] shrnout do sedmi kroků, které zde uvádím upravené a s vlastními komentáři.

1. Určení konečných požadavků na technické parametry jednotky na základě akceptovaných konečných hodnot parametrů této jednotky. (Komentář: Jde o stanovení požadavků na měřicí vybavení na základě našich požadavků na přesnost měření).
2. Určení tolerančních hranic pro parametr měřicího vybavení, které korespondují s akceptovatelnou nejistotou zkušebního procesu. (Komentář: Jde o určení akceptovatelné nepřesnosti měření, podle které se následně upravují požadavky na měřicí vybavení).
3. Určení odpovídající cílové spolehlivosti měření pro parametry měřicího vybavení. (Komentář: Kromě tolerančních hranic a konfidenční úrovně měření je potřeba také definovat požadovanou spolehlivost měření. To úzce souvisí s konfirmačním systémem).
4. Nashromáždění informací o měřicím vybavení pro ozřejmění procesu růstu nejistoty tohoto vybavení. (Komentář: Souvisí s kap. 2.2.1, jedná se především o informace s kalibrační historie, od výrobce a o informace o zamýšleném použití měřicího vybavení).
5. Určení spolehlivostních modelů a koeficientů za použití metod odhadu co největší věrohodnosti. (Komentář: V podstatě se jedná o volbu co nejlepšího způsobu volby kalibračního intervalu pro danou konkrétní situaci).
6. Identifikace procesu růstu nejistoty parametru měřicího vybavení. Volba odpovídajícího spolehlivostního modelu pro měření (Komentář: Vyčíslení parametrů zvolené metody. V podstatě se jedná o nastavení modelu pro konkrétní situaci. Dále je třeba na základě tohoto přizpůsobeného modelu vypracovat metodiku měření, jelikož následné měření a kalibrace spolu úzce souvisejí).
7. Výpočet kalibračních intervalů, které korespondují s odpovídající cílovou spolehlivostí měření (Komentář: Po vypracování metodiky měření je třeba zpětně zkorigovat model pro návrh kalibračních intervalů. Na jeho základě se pak vypočtou kalibrační intervaly).

Pro proces návrhu kalibračních intervalů musí být každý krok dostatečně znám. Na jedné straně je poptávka po jednoznačném obecném návodu pro určování kalibračních intervalů, ale rozdíly mezi laboratořemi, metodami a měřicím vybavením jsou takové, že pro různé laboratoře je potřeba různý návrh procesu určování kalibračních intervalů. Pro

návrh takového procesu je nezbytná kvalifikace v metrologii, statistice a vysoká odborná i praktická znalost měřicího vybavení a použité měřicí metody.

### 2.2.3 *Metody určování kalibračních intervalů*

Metod určování kalibračních intervalů existuje celá řada. Problémem je ale míra jejich důvěryhodnosti. Úkolem pravidelné kalibrace je ověřování toho, jestli jsou parametry měřicího přístroje v požadovaných mezích. Zajímá nás pravděpodobnost toho, že přístroj má v intervalu mezi kalibracemi opravdu požadované charakteristiky. Vzhledem k tomu, že se informaci o vývoji charakteristik přístroje snažíme teprve postupnými kalibracemi zjišťovat, a také vzhledem k možné náhlé změně vývoje, je určování jakékoliv pravděpodobnosti velice obtížné. A přitom se od kalibrace očekává, že zajistí správné měření s vysokou konfidencí. Z toho, že máme na jedné straně velice sofistikované kalibrační měření, a na druhé straně se potýkáme s odhadem kalibračního intervalu, pramení i přístup, který ke kalibračním intervalům zaujímají legislativa a standardy.

Na otázku, kdo kalibrační interval stanovuje, nalezneme odpověď v již zmiňovaném zákoně o metrologii [32]. Dle [42] z formulace tohoto zákona vyplývá to, že dobu kalibrace si určuje uživatel sám. Standard [11] dokonce uvádí, že součástí kalibračního listu a kalibrační značky nesmí být doporučení, které by se týkalo kalibračního intervalu s výjimkou informace, která byla dohodnuta se zákazníkem. To se samozřejmě nevztahuje na případy, kdy zákon stanoví jinak.

Zodpovědnost za délku kalibračního intervalu leží tedy na uživateli, protože vzhledem k tomu, že závislost reálného udržení charakteristik přístroje záleží na tolika vlivech, nelze zodpovědnost za odhad kalibračního intervalu přenášet na kalibrační laboratoř.

Zůstává otázka, jakou metodou kalibrační interval stanovit. Vzhledem ke komplikovanosti problematiky nelze doporučit jednu konkrétní metodu, a tak standardy a odborné publikace, které o délce kalibračních intervalů pojednávají, uvádějí metod více. Uznávaným a často citovaným dokumentem je [43]. Tento dokument vydaný NCSLI (viz kap. 7) uvádí pět možných metod pro určení kalibračního intervalu.

- Metoda obecného intervalu
- Metoda „zapůjčeného“ intervalu
- Metody technické analýzy
- Metody reakce
- Metody odhadu pravděpodobnosti

Dále následující popis jednotlivých metod je zpravovaný dle [42].

*Metoda obecného intervalu* je metoda, při které se stanoví jeden kalibrační interval, který se nemění a je stejně dlouhý pro všechny přístroje dané organizace. Je zřejmé, že metoda nereflktuje požadavky a kritičnost jednotlivých měřicích úloh. Při této metodě nejsou potřeba žádné další náklady kromě samotných výdajů na kalibraci, ale přesto je tato metoda jedna z nejdražších. Dochází totiž k tomu, že některá zařízení se kalibrují zbytečně často a u jiných naopak hrozí ztráty v důsledku nedostatečné frekvence kalibrace.

*Metoda „zapůjčeného“ intervalu* je založená na přejímání kalibračních intervalů od jiných subjektů. Výsledky metody záleží na tom, jaké má organizace, od které daný kalibrační interval přejímáme, zkušenosti s kalibrovaným přístrojem a nakolik se její provozní podmínky blíží laboratoři naší.

*Metody technické analýzy* sdružují všechny metody, které již závisejí na metrologických datech – konkrétně na podrobnějších znalostech charakteristik a funkce měřicích přístrojů. Metody technické analýzy se dělí na tři podskupiny:

- Podobnost přístrojů – vychází se z podobnosti typu. Tedy z toho, že jsou známy metrologické vlastnosti určitého typu přístroje a zároveň známe vztah mezi tímto přístrojem a přístrojem, který chceme kalibrovat.
- Doporučení nebo údaje výrobce – podklady od výrobce se používají jako východisko pro stanovení kalibračního intervalu. Jako doplňující informace slouží zamýšlené používání a požadavky na spolehlivost měření.
- Analýza konstrukce – provádí se funkční analýza celkového zapojení přístroje se zaměřením na kritické části, jako například drift operačních zesilovačů, stabilita časové základny atp.

*Metody reakce* zahrnují metody, které kalibrační interval upravují na základě výsledků předchozích kalibrací. Obecně se tyto metody řadí mezi algoritmické, protože jsou založeny na experimentu, při kterém se nastaví určitý kalibrační interval, a na základě výsledku experimentu – tedy na základě výsledku další kalibrace – se rozhodne, zdali se kalibrační interval zkrátí, prodlouží nebo ponechá. Metody reakce se dají podle postupu rozdělit na tři druhy:

- Metoda jednoduché reakce – kalibrační interval je upravován na základě výsledku předcházející kalibrace tak, že se interval ponechá, zkrátí nebo prodlouží o fixní část nebo o násobek existujícího intervalu.
- Metoda přírůstkové reakce – podobné jako u jednoduché reakce, pouze se zkrácení či prodloužení intervalu progresivně zmenšuje po každé úpravě tak, až se asymptotickým přibližováním dosáhne správného intervalu. Tato metoda je nevhodná, pokud se znatelně mění průběh změn charakteristik měřidla.
- Metoda testu intervalů – tato metoda se snaží eliminovat nedostatky ostatních algoritmických metod za pomoci zařazení statistického testování do porovnávacího cyklu metody. Metoda se považuje za jednu z mála metod, která je opravdu dosáhne nastavení správného kalibračního intervalu za použití pouze relativně malého objemu kalibrační historie. Podrobněji je tato metoda popsána v kap. 2.2.3.1.

*Metody odhadu pravděpodobnosti* jsou metody, které vycházejí ze statistické analýzy dat. Neobejdou se tedy bez dostatečného množství informací. U mnoha přístrojů je doba shromažďování dat pro statistickou analýzu bohužel kratší nebo stejně dlouhá jako jejich morální životnost. Tím je dána velká nevýhoda metody, kterou nevyváží ani exaktní přístup, který tato metoda nabízí. Jednou z prakticky využívaných statistických metod je určování kalibračních intervalů za pomoci Weibullova rozdělení pravděpodobnosti. Tato metoda je podrobněji rozebrána dále v kap. 2.2.3.2.

V publikaci [42] je ještě zmíněna tzv. *metoda kontroly „černou skříňkou“*. Tato metoda pracuje s častou a pravidelnou kontrolou zařízení pomocí zjednodušené kalibrace na standardu určeném pro tento účel. Pokud začne přístroj vykazovat posun charakteristik a hrozí překročení požadovaných mezí, přístroj se pošle na kalibraci. Tato metoda ověření je často nezbytná, pokud by následky nesprávného měření byly kritické.

V následujících dvou podkapitolách jsou přiblíženy dvě metody, které se v současnosti pro určování kalibračních intervalů používají. Jejich vzájemné praktické porovnání je provedeno v kap. 3.2.1.

### 2.2.3.1 Castrupova metoda určování délky kalibračních intervalů

Metoda určování kalibračních intervalů doporučená [43] je často označována jako algoritmická metoda A3, právě podle označení v tomto dokumentu. Další alternativní pojmenování je Castrupova metoda, podle doktora Castrupa, který metodu rozpracoval.

Tato metoda porovnává zjištěnou spolehlivost ( $R_{zjištěná}$ ) se spolehlivostí cílovou ( $R_{cílová}$ ). Pracuje s jednoduchým poměrem počtu testovaných jednotek ku počtu jednotek, které vyhověly. Porovnáním těchto dvou spolehlivostí dostáváme tzv. průměrný interval, který se pak porovnává s průměrnou hladinou spolehlivosti. Pokud tento interval neodpovídá hladině konfidence daného měření, tak je třeba upravit kalibrační interval. Splnění konfidenční úrovně je dáno horním a dolním kontrolním limitem  $p_U$  a  $p_L$  (viz (2.30) a (2.31)).

$$\sum_{k=0}^x \binom{n}{k} p_U^k (1-p_U)^{n-k} = \begin{cases} \frac{1-C}{2}, & 0 < x < n \\ 1, & x = n \\ 1 - \left(\frac{1-C}{2}\right)^{1/n}, & x = 0 \end{cases}, \quad \sum_{k=n-x}^n \binom{n}{k} p_L^k (1-p_L)^{n-k} = \begin{cases} \frac{1-C}{2}, & 0 < x < n \\ 1, & x = n \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

(2.30) a (2.31)

kde C je konfidence změny intervalu.

Jestliže platí, že  $p_L < R_{cílová} < p_U$ , tak byl splněn test průměrného intervalu, jinak je test negativní. Podrobnější analýze spolehlivosti metody A3 se věnuje přímo [43]. Obecný algoritmus metody A3, který se používá v softwaru reálně nasazovaném v praktických aplikacích je tento [44]:

#### Algoritmus úpravy kal. intervalu:

Jestliže  $R_z > R_c$  pak

jestliže  $C = 1$  pak

$$l_z = 2 l_p$$

jinak

$$y = (R_z - R_c) / (1 / C)$$

jestliže  $y > 25$  pak

$$l_z = \text{Max} (l_{\max}, l_{\text{Ing}})$$

jinak

$$l_z = \text{Int} (10^y l_p + 0,5)$$

jinak  $l_z = \text{Int} [10^{(R_z - R_c)C} l_p + 0,5]$

#### Algoritmus stanovení kal. intervalu:

Jestliže  $l_z > 2 l_p$  pak

$$l_r = 2 l_{\text{avg}}$$

jinak jestliže  $l_z > 1,2 l_{\text{Ing}}$  a  $l_{\text{Ing}} > 0$  pak

$$l_r = 1,2 l_{\text{Ing}}$$

jinak jestliže  $l_z < l_p / 2$  pak

$$l_z = l_p / 2$$

jinak

$$l_r = l_z$$

Jestliže  $l_r > 1,2 l_{\text{Ing}}$  a  $l_{\text{Ing}} > 0$  pak  $l_r = 1,2 l_{\text{Ing}}$

Jestliže  $l_r > l_{\max}$  a  $l_{\max} > 0$  pak  $l_r = l_{\max}$

Jestliže  $l_r < l_{\min}$  pak  $l_r = l_{\min}$



kde  $R_z$  je  $R_{zjištěná}$ ,  $R_c$  je  $R_{cfllová}$ ,  $I_r$  je doporučený kal. interval,  $I_z$  je interval zkoušený,  $I_p$  je interval průměrný zjištěný,  $I_{lng}$  interval nejdelší zjištěný,  $I_{max}$  – maximální povolený interval a  $I_{min}$  – minimální povolený interval,  $I_{avg}$  – průměrný interval.

### 2.2.3.2 Určování kalibračních intervalů za pomoci Weibullova rozložení pravděpodobnosti

Ze všech statistických metod využívajících různá rozložení pravděpodobnosti se v současné době pro výpočet kalibračních intervalů jeví jako nejvhodnější metoda využívající tzv. *Weibullovo rozložení pravděpodobnosti*. A to z toho důvodu, že tříparametrové Weibullovo rozložení je natolik flexibilní, že dokáže dostatečně popsat reálnou situaci. Není ani důležité, že toto rozložení dokáže popsat některá další teoretická rozložení pravděpodobnosti, jako například rozložení normální a rozložení exponenciální, ale podstatné je, že dokáže věrně popsat rozložené pravděpodobnosti, které vzniklo složením vícero vlivů. Další charakteristická vlastnost Weibullova rozložení, která je pro nasazení při určování kalibračních intervalů důležitá, je způsobilost pro malé soubory dat. Tato vlastnost byla prezentována samotným autorem v původním článku [46].

Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozložení dle [48] závisí na třech parametrech: parametru tvaru  $b$ , parametru umístění  $g$  a parametru stupnice  $h$  a je dána vztahem

$$f(x) = \frac{b}{h} \left( \frac{x-g}{h} \right)^{(b-1)} \exp - \left( \frac{x-g}{h} \right)^b \quad (2.32)$$

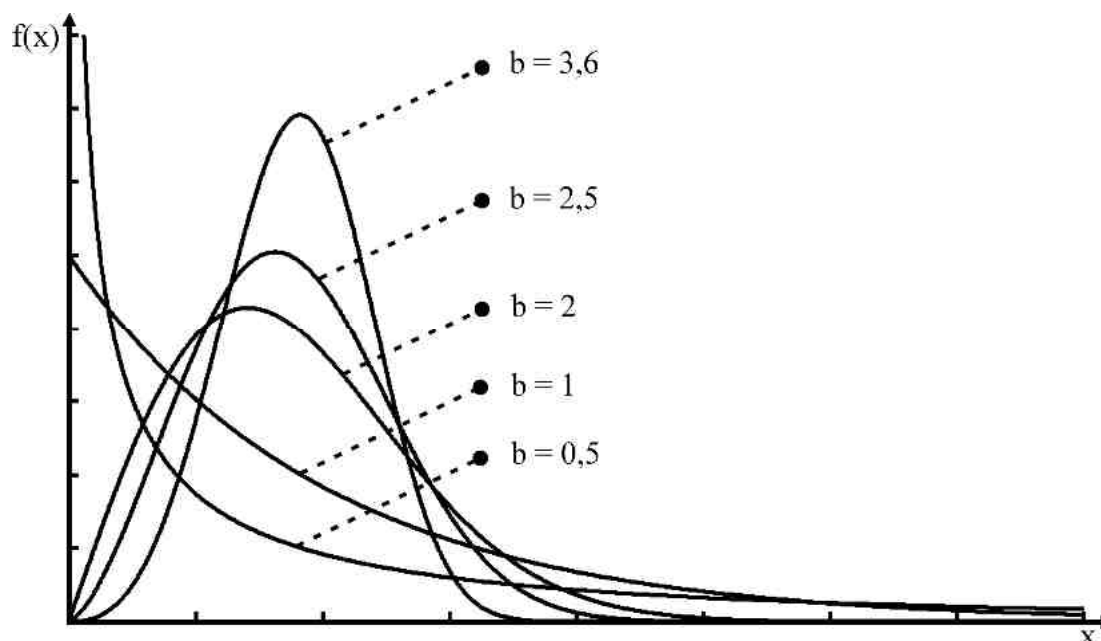
Tato funkce hustoty pravděpodobnosti se někdy zjednodušuje na dvouparametrovou (2.33) nebo dále na jednoparametrovou formu (2.34), kdy je parametr umístění  $g$  roven 0 a v případě jednoparametrové formy je parametr tvaru  $b$  konstantou  $C$ .

$$f(x) = \frac{b}{h} \left( \frac{x}{h} \right)^{(b-1)} \exp - \left( \frac{x}{h} \right)^b \quad (2.33)$$

$$f(x) = \frac{b}{h} \left( \frac{x}{h} \right)^{(C-1)} \exp - \left( \frac{x}{h} \right)^C \quad (2.34)$$

Bližší popis jednotlivých parametrů lze nalézt např. v [48]. Pro přehled jen krátce uvedeme následující: Parametr tvaru  $b$  je větší než nula a typicky nabývá hodnot od 0,5 do 8. Při  $b = 1$  přechází Weibullovo rozložení v rozložení exponenciální, při  $b = 2$  v rozložení Rayleighovo, při  $b = 2,5$  v lognormální a při  $b = 3,6$  v rozložení normální. Parametr měřítka  $h$  je větší než nula a v případě analýzy časového děje určuje časové měřítko. Parametr udává dobu, při které dojde s 63,2% pravděpodobností k vybočení sledovaného procesu z tolerančních hranic. Parametr umístění  $g$  může nabývat hodnot od  $-\infty$  do  $\infty$ , ale musí být minimálně tak velký jako proměnná  $x$  podle které běží funkce hustoty pravděpodobnosti. Pakliže Weibullovo rozložení analyzujeme nějakou časovou řadu, tak funkce hustoty pravděpodobnosti běží podle času  $t$ , což je i případ návrhu kalibračních intervalů. Parametr umístění určuje, od jakého času může dojít k neshodě. Flexibilitu Weibullova rozložení dokládá následující Obr. 9, na kterém je

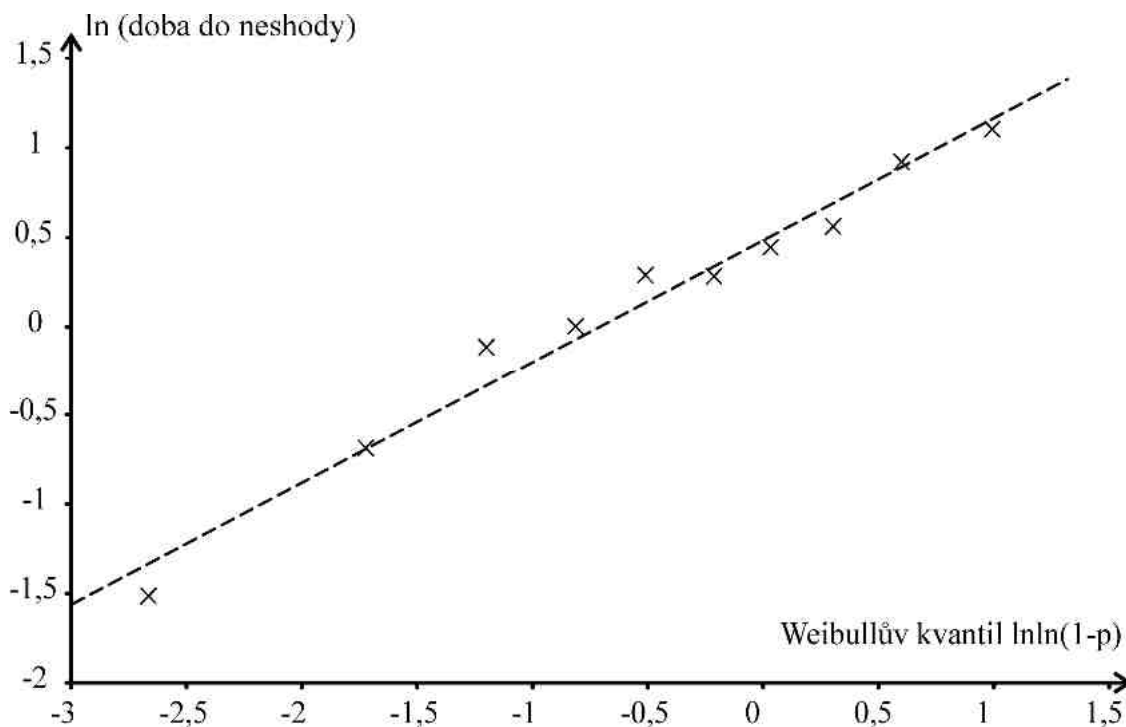
dobře vidět schopnost aproximovat jiná rozložení i při konstantním parametru měřítka a umístění ( $h = 1, g = 0$ ).



Obr. 9: Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro různé parametry tvaru  $b$  (při konstantním parametru měřítka  $h = 1$  a parametru umístění  $g = 0$ )

Krom flexibility je pro praktické využití Weibullova rozložení podstatný také další fakt: relativně jednoduché určení použitelnosti tohoto rozložení a rychlý odhad jeho parametrů pomocí *Weibullova pravděpodobnostního grafu*.

V pravděpodobnostním grafu se zjištěné údaje vynášejí ve speciálně transformovaném měřítku. Transformace je takového charakteru, že převádí kumulativní distribuční funkci na funkci lineární. Na osu Y se v logaritmickém měřítku vynášejí doba do neshody a na osu X se v dvojitým logaritmickém měřítku vynášejí kumulativní pravděpodobnost  $\ln \ln(1-p)$ , kde  $p = (i - 0,3)/(n + 0,4)$ , kde  $i$  je pořadí a  $n$  počet pozorování. Takto transformované hodnoty na ose X se také označují jako *Weibullův kvantil*. Příklad Weibullova pravděpodobnostního grafu je na následujícím Obr.10.



Obr. 10: Weibullův pravděpodobnostní graf

Z takto konstruovaného grafu můžeme jednoduše určit použitelnost Weibullova rozložení. Stačí vizuálně posoudit, zda zobrazená data jeví jasnou lineární korelaci, zjednodušeně řečeno, zda se dají zobrazená data proložit přímkou. Můžeme také lehce postřehnout odlehlé extrémní hodnoty. V neposlední řadě lze z grafu přímo odhadnout parametry Weibullova rozložení.

To je možné díky transformačním vztahům, které převádí Weibullovo kumulativní distribuční funkci

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{h}\right)^b\right) \quad (2.35)$$

na rovnici přímky

$$Y = \text{směrnice} \cdot X + \text{úsek}.$$

Pozn.: V literatuře obvyklé značení parametrů přímky  $k$  a  $q$  (respektive  $m$  a  $b$  v anglickém podání) jsou v této práci nahrazeny pojmy *směrnice* a *úsek*, aby nedošlo ke kolizi se značením koeficientu krytí a odhadu očekávané hodnoty veličiny symboly (respektive hmotnosti a parametru Weibullova rozložení).

Potom se pro souřadnice  $X$ ,  $Y$  a parametry  $b$  a  $h$  platí následující vztahy:

$$X = \ln x, Y = \ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - F(x)} \right) \right], b = \text{směrnice}, b \ln h = \text{úsek} \quad (2.36)$$

Tyto vztahy byly získány pomocí následujících matematických úprav vztahu (2.35):

$$1 - F(x) = \exp\left(-\left(\frac{x}{h}\right)^b\right) \quad (2.37)$$

$$\ln(1 - F(x)) = -\left(\frac{x}{h}\right)^b \quad (2.38)$$

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right) = \left(\frac{x}{h}\right)^b \quad (2.39)$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right)\right] = b \ln\left(\frac{x}{h}\right) \quad (2.40)$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right)\right] = b \ln x - b \ln h \quad (2.41)$$

To znamená, že parametr tvaru  $b$  je dán sklonem přímky a parametr měřítka  $h$  může být vypočten ze vztahu

$$h = \exp\left(-\frac{q}{b}\right) \quad (2.42)$$

Uvedená metoda pravděpodobnostního grafu našla pro svou jednoduchost a možnost rychlého použití široké uplatnění v praxi. Při dnešním rozšíření informačních technologií je přesný odhad parametrů Weibullova rozložení záležitostí okamžiku. Problém ale vzniká v tom momentě, kdy jsou empiricky získaná data nehomogenní, tedy složená z různých měření, zjištění a informací získaných z vnějších zdrojů. To je možná také důvod, proč se široce užívané Weibullovo rozložení zatím příliš neprosadilo jako majoritní metoda výpočtu kalibračních intervalů. Dnešní komerční softwarové implementace (jako např. SuperSMITH™ [49]) však již obsahují testovací procedury a algoritmy speciálně uzpůsobené pro návrh kalibračních intervalů. Širšímu nasazení Weibullova rozložení při určování délky kalibračního intervalu tedy nic nebrání a jenom budoucí praxe může ukázat vhodnost konkrétních implementací.

Dle [47] je Weibullovo pravděpodobnostní graf pro určení kalibračních intervalů ideální. Praxe požaduje dostatečně flexibilní návrh kalibračních intervalů, které nebudou ani příliš dlouhé, ani příliš krátké, a budou tedy zajišťovat metrologické charakteristiky měřicího zařízení při minimalizovaných nákladech na kalibraci. Takovým nárokům vyhoví pouze *just-in-time kalibrace*, pro kterou se užití Weibullova rozložení přímo nabízí. Just-in-time kalibrací se myslí kalibrace, při které se vyhodnocují aktuální data z jednotlivých měřicích zařízení.

Základní konstrukce Weibullova pravděpodobnostního grafu pro návrh kalibračního intervalu není obtížná, ale základním předpokladem jsou relevantní data. Ideální jsou doby, za jaké se dostalo měřicího zařízení mimo toleranci, kterou by měla kalibrace zajišťovat. Získat tato data je mnohdy obtížné. Jediné co bývá k dispozici, jsou data z kalibrací, ze kterých vyčteme, zda přístroj vyhověl či nevyhověl. Přesnější určení času, kdy se přístroj dostal mimo požadované meze, chybí. Jednou z možností

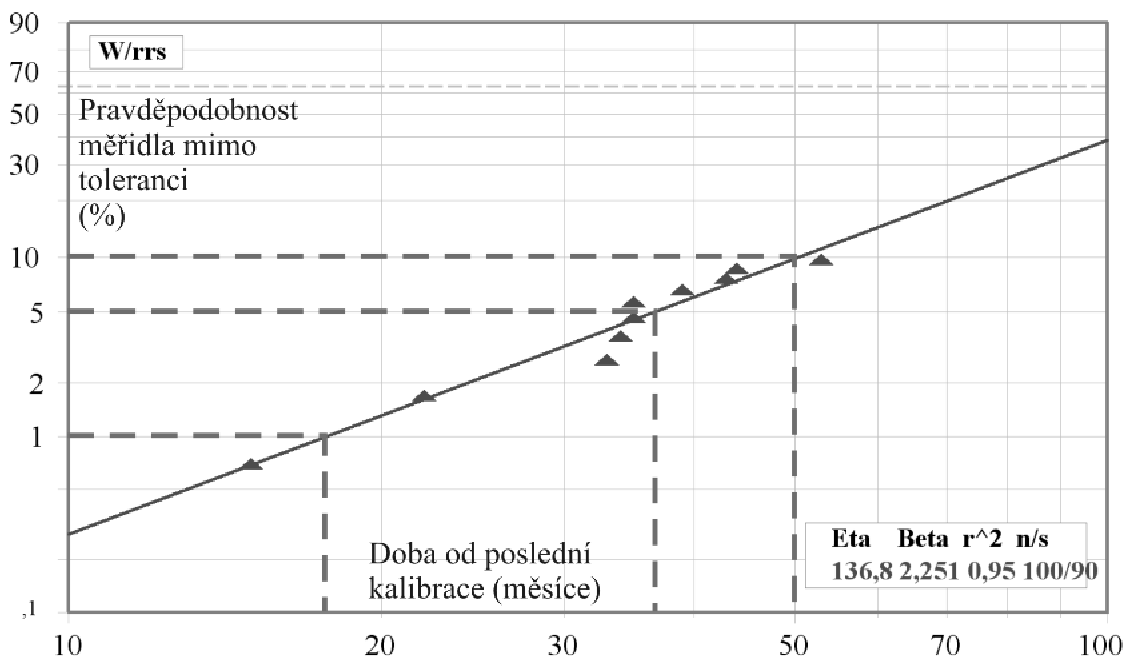
jak z těchto dat vycházet, je sledovat větší množství přístrojů a zjišťovat, jaké procento z nich při pevně daném kalibračním intervalu nevyhoví. Další možností je sledovat měřicí vybavení pomocí pravidelného porovnání se známými hodnotami etalonů, tedy v podstatě pomocí pravidelných kalibračních měření se sníženými nároky na provedení. Potom budeme mít k dispozici údaj o tom, kolik přístrojů nevyhovělo a kdy se dostaly mimo požadované meze. Z těchto údajů je se pak dá Weibullovo pravděpodobnostní graf zkonstruovat.

Pro objasnění situace poslouží následující příklad výpočtu kalibračního intervalu pomocí programu SuperSMITH [48] (uvedené hodnoty jsou fiktivní, protože se nepodařilo pro demonstraci obstarat dostatečně velký soubor dat): Máme 100 přístrojů, z nichž 10 ve sledovaném intervalu 60 měsíců vybočilo z požadovaných přesností v různých časech od počáteční kalibrace. Ověřování přesnosti probíhalo vždy v intervalu jednoho měsíce. V následující tabulce Tab. 2.2 jsou zobrazeny časové intervaly, ve kterých měřidla selhala.

Tab. 2.2: Zjištěné doby od poslední kalibrace, za které jednotlivé přístroje vybočily mimo požadované toleranční hranice

Číslo přístroje (-)	P65	P33	P21	P89	P3	P52	P70	P15	P82	P41
Doba do překročení požadovaných mezí (měsíce)	15	22	33	34	35	35	39	43	44	53

Znázorníme-li situaci Weibullovo pravděpodobnostním grafem dostaneme následující Obr. 11.



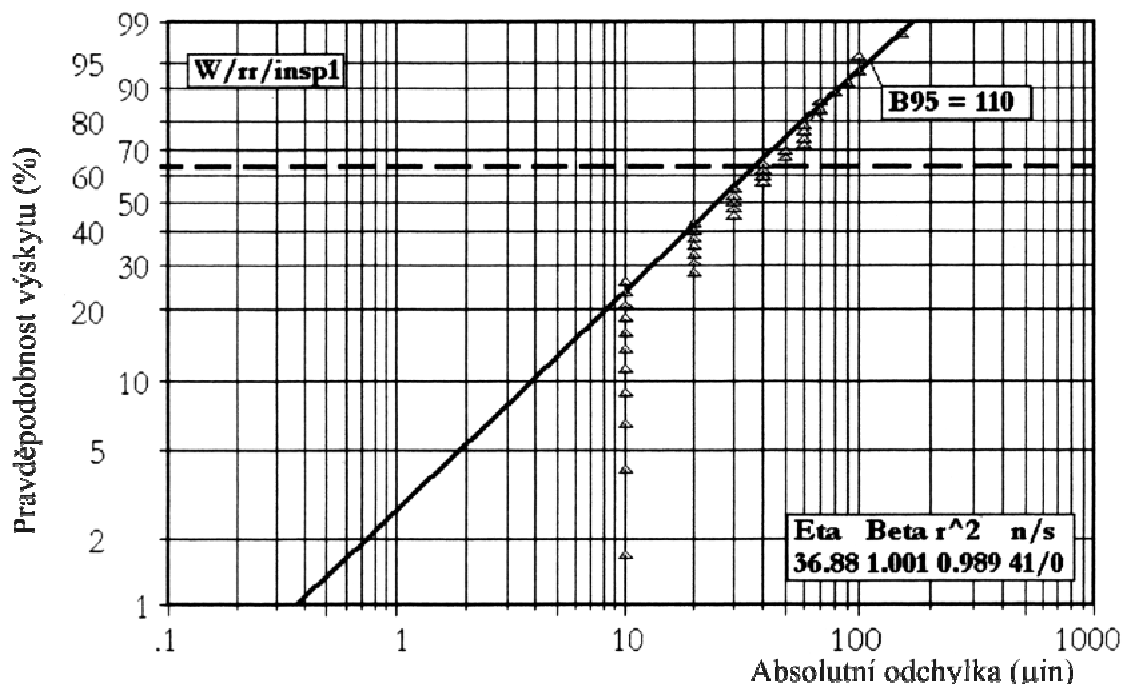
Obr. 11: Kalibrační intervaly založené na 10 přístrojích mimo meze a 90 vyhovujících přístrojích

Z grafu můžeme přímo odečítat, jak dlouhé by měly být kalibrační intervaly pro požadovanou hladinu confidence. Například pro 90% hladinu pravděpodobnosti to bude 50,35 měsíců, pro 95% hladinu 36,57 měsíců a pro 99% hladinu 17,73 měsíců.

V průmyslu je dobrou praxí používat 95% hladinu pravděpodobnosti [57]. V tomto případě by výsledkem analýzy byla doporučená délka kalibračního intervalu 3 roky.

Toto využití Weibullova rozložení při návrhu kalibračních intervalů ale není jediné. Jedna z novějších metod pracuje s páry měřicích přístrojů, z nichž jeden je nadbytečný a nepoužívá se k měření, ale pouze k porovnávání [47]. Zaznamenává se několik prvních rozdílů mezi těmito přístroji (krom nulových odchylek, které se nezaznamenávají). Pokud se změní významně charakteristika jednoho přístroje, je třeba jej recalibrovat. Takovým způsobem lze tedy sledovat i přístroj mezi stanovenými kalibračními intervaly a v případě změny metrologických charakteristik včas zasáhnout. Takto jsme schopni odhalit negativní posuny metrologických charakteristik, které vznikly například v důsledku přetížení, nárazů, znečištění, atd. Následující Obr. 12, zachycuje příklad Weibullova pravděpodobnostního grafu pro takové sledování v rámci kalibračního intervalu.

Na ose X není tentokrát doba, ale absolutní rozdíl mezi porovnávanými přístroji. Z několika prvních porovnání se stanoví parametry Weibullova rozložení. Potom můžeme pro příslušnou pravděpodobnostní hladinu (zde 95 %) stanovit maximální odchylku, při jejíž překročení již nelze předpokládat, že přístroj měří stejně přesně jako při původní kalibraci.



Obr. 12: Absolutní rozdíly zjištěné při opakovaném porovnávání měřicího a redundantního přístroje [47]

Na Obr. 12 je příklad přejatý z [47]. Jsou zde porovnávána dvě posuvná měřidla. Z grafu můžeme odečíst maximální možnou výchylku 110 mikropalců\*, kterou nemůže rozdíl mezi přístroji překročit, aniž by zpochybnil 95% úroveň konfidence. Tato úroveň

\* jednotka byla do textu i grafu přejata z [47] bez převodu do SI, protože nebyla k dispozici zdrojová data pro konstrukci přepracovaného grafu

je již dosti vysoká a odpovídá požadavkům na kalibrační měření definovaných v ISO 10012 [14]. Takto získaná data je vhodné uchovávat, mohou být po nasbírání dostatečné historie použita k úpravě samotného kalibračního intervalu. [47].

Nastíněné příklady a shrnutá teorie naznačují možnosti využití Weibullova rozložení při návrhu kalibračních intervalů. Podrobnější analýza a další modifikace budou uvedeny v kap. 3.2.1.1.

#### **2.2.4 Shrnutí výhod a nevýhod představených přístupů**

Při návrhu kalibračních intervalů se vždy potýkáme s nedostatkem údajů. Tudíž je každá metoda výpočtu kalibračního intervalu odhadem. Naším cílem je zajistit metrologické charakteristiky měřidla s požadovanou pravděpodobností. Pochybnosti nás nutí kalibrační interval zkracovat, přestože to sebou nese zvýšené náklady.

Při posuzování metody pro výpočet kalibračních intervalů jsou nejdůležitějším faktorem výsledky těchto metod. Zda se opravdu povedlo zajistit požadovanou přesnost či nikoliv. Krom tohoto faktu je ale také nutno posoudit, za jakou cenu jsme výsledků dosáhli. Do nákladů na kalibraci v konečném důsledku spadá i náročnost zvolené výpočetní metody.

Stanovit náklady na kalibrace, čas zaměstnanců, ztráty z prostojů a další externality je poměrně jednoduché, ale srovnat metody z hlediska poskytovaných výsledků je složitější. Bez častých ověřovacích měření v podstatě nevíme, jestli dané kalibrační intervaly opravdu zajistily požadované metrologické charakteristiky měřidla. Záleží také na konkrétní měřicí metodice a přístroji. Proto nelze výpočetní metody obecně porovnat. Srovnání lze provést buď teoreticky na konkrétních simulovaných případech, a nebo na základě rozsáhlých dat z praxe. Bohužel není k dispozici žádná veřejná databáze, která by obsahovala úspěšnost návrhu kalibračních intervalů v různých měřeních s různými přístroji. Návrh kalibračních intervalů je totiž mnohdy know-how dané laboratoře a výrobci měřicích přístrojů, také z pochopitelných důvodů nezveřejňují analýzy dat z kalibračních měření. Proto bude pro porovnání metod v kapitole 3.2.1 použito přímého srovnání na konkrétním simulovaném případě.

Obecně lze prohlásit, že metody přestavené v kapitole 2.2.3 se jeví jako použitelné. Žádná z nich není pro výpočet kalibračních intervalů vysloveně nevhodná. Při konkrétní aplikaci je třeba rozumět principu těchto metod a zvolit tu nejvhodnější. Vytvořit návod pro volbu konkrétní metody je složitá záležitost, která vyžaduje rozsáhlé praktické zkušenosti se všemi metodami v reálném nasazení. Vytvoření takového návodu přesahuje možnosti této, z větší části teoretické, disertační práce.

Konkrétní slabé stránky představených metod vyplývají z jejich principu. U statistických metod je to potřeba většího množství dat. Tento nedostatek lze alespoň částečně minimalizovat použitím představeného Weibullova rozložení, které umožňuje tvořit relativně spolehlivé závěry z mála údajů. U statických metod je vždy riziko špatného použití, protože v dnešní době převážně počítačové zpracování svádí k tomu, abychom pouze vložili data a využili výsledek bez toho, abychom rozuměli principu metody. Tomu se lze vyhnout jenom tím, že se jednoznačně formulují vstupní podmínky výpočtu a jejich splnění se bude vždy kontrolovat. U algoritmičkových metod se může zdát jejich nevýhodou zdánlivá nesofistikovanost. Jenomže výkonnost metody se neposuzuje její teoretickou rozpracovaností, ale reálnými výsledky a náklady. Například metoda reakce nemusí v konečném důsledku dávat špatné výsledky, i když neanalyzuje problém dopodrobna a nesnaží se ani přesně vyjádřit svojí matematickou spolehlivost.

Do budoucna je prostor zejména pro kombinování vícero výpočetních metod a také pro jejich modifikace. Základní modifikací, která je potřeba u všech metod je zahrnutí optimalizace nákladů, protože jak bude dále ukázáno v kap. 3.2.1.1, neznamenají co nejdelší kalibrační intervaly automaticky nejmenší náklady. V některých případech, kdy by vybočení z požadované přesnosti měřicího systému znamenalo velké finanční ztráty, se totiž vyplatí kalibrační interval naopak zkrátit.

Další oblastí, na kterou se bude potřeba zaměřit, je verifikace výsledků metod výpočtu kalibračního intervalu. To znamená zavést systém zpětné vazby, který by kontroloval výsledky kalibrací a umožnil včas zavrhnout nebo modifikovat užívanou metodu určování délky kalibračního intervalu.

### **2.3 Konfirmační systém**

Konfirmační systém je takový systém, který zajišťuje přesnost a správnost měření. Konfirmační systém nahlíží na měření z procesního hlediska, ale to neznamená, že je jednoduchým systémem zabývajícím se měřením jen obecně. Naopak. Konfirmační systém zaštiťuje problematiku měření v celé šíři a do nejmenších podrobností.

Mezi prvky, které v sobě konfirmační systém zahrnuje, patří:

- Návrh měřicího systému.

Zvládnutí a unifikování procesu návrhu z procesního hlediska. V první řadě musí návrh vycházet z aktuálních a relevantních informací. Musí být k dispozici jasné zadání, aktuální standardy. Dále musí být v průběhu návrhu ověřovány použité předpoklady. Pokud se použije zavedená či mírně modifikovaná metoda měření, je třeba ověřit, zda je vhodná. Pokud je postup použitelný, tak je potřeba v samotném návrhu zajistit jeho správnou aplikaci, aby se zamezilo možným pochybením při realizaci návrhu. Vše při návrhu měřicího systému musí být podřízeno zadání. To platí zejména o požadované přesnosti měření. Podle ní se volí metodika, přístroje, kalibrační systém a způsob výpočtu a vyjadřování výsledku.

- Realizace procesu měření.

Měření musí být metrologicky confirmované (viz dále a kap. 2.3.3), to znamená, že musí být kontrolována a zajišťována kvalita měřicí techniky a měřicího vybavení. Při procesu měření je třeba monitorovat veškeré vnější podmínky, které by mohly mít na měření vliv. Přístup k měření, měřicí technice a záznamů musí být kontrolován a případně omezen. Musí být zabezpečeno zaznamenávání problémů a analýza výsledků tak, aby bylo možno současný systém zdokonalovat a také proto, aby se vytvořila zpětná vazba pro fázi návrhu.

- Dokumentace - veškeré písemné i elektronické záznamy.

Zahrnuje údaje o metrologických charakteristikách měřicích přístrojů, údaje o kalibraci, popis metodik měření, postupy měření, pracovní listy, záznamy o kvalifikaci a odpovědnosti personálu laboratoře, smlouvy, záznamy o měření, záznamy o zpracování výsledků, požadavky zákazníka, záznamy o zpětné vazbě zákazníka a záznamy o prověrkách konfirmačního systému.

Smyslem konfirmačního systému je tedy kontrola procesu měření a procesů s ním souvisejících tak, aby byla zajištěna přesnost a správnost měření. Musí být zajištěna dostatečná blízkost naměřeného výsledku k reálné hodnotě měřeného parametru



(metodika, použité přístroje, kalibrace), dále je třeba odhadnout, jak blízko jsme se k reálné hodnotě dostali (výpočet nejistoty měření) a je nutné řídit veškeré parametry, které mohou zpochybnit správnost měření (např. značení, skladování přístrojů, dokumentace, řízení lidských zdrojů, atd.).

Konfirmační systém sice není složitý co do definice, ale jeho návrh a udržování jsou komplexní činnosti. I při nejlepší snaze se vybudování fungujícího konfirmačního systému nemusí podařit. Pro zajištění jednotné úrovně konfirmačního systému bylo vypracováno několik mezinárodních standardů. V systému norem ISO se jedná zejména o normu ISO 10012 [14]. V následujícím textu budou vybrány nejdůležitější požadavky, které jsou na konfirmační systém kladeny. Vytvoření konfirmačního systému, který by vyhověl všem požadavkům je mnohdy obtížné. Není to tím, že by požadavky byly nějak přehnané. Je to proto, že samotný systém prostě nejde vytvořit jen podle požadavků. Analogickým příkladem může být elektromotor: pokud stanovíme požadavky na otáčky, výkon, moment, váhu, cenu a účinnost motoru, tak se sice návrh těmto požadavkům podřídí, ale samotné požadavky nám žádný konkrétní postup pro konstrukci nedají.

Konfirmační systém je v podstatě realizací systému řízení jakosti v oblasti měření. Proto také každý podnik, který zavádí systém řízení jakosti podle norem řady ISO 9000, musí mít zaveden konfirmační systém měření, pokud nějaké měření realizuje. Nemusí se jednat ani o sofistikovaná laboratorní měření, ale například o testování ve výrobě. Systém řízení jakosti nemůže být totiž certifikován, pokud se v rámci výroby či výstupní kontroly provádí měření, které není patřičně řízeno a u kterého není zajišťována správnost a požadovaná přesnost (tedy kvalita) měření.



Obr. 13: Model systému managementu měření (zpracováno dle [10])

Na Obr. 13 je znázorněn model celého systému managementu měření. Jeho hlavním vstupem je požadavek zákazníka a hlavním výstupem výsledky měření. Kromě zajištění odpovídajícího výstupu je cílem konfirmačního systému neustálé zlepšování sebe sama na základně propracované zpětné vazby. Tento rys by ostatně měl být společný všem systémům řízení jakosti jakéhokoliv procesu. Hlavními prvky konfirmačního systému jsou Odpovědnost managementu, řízení zdrojů (lidských, informačních i materiálních) a metrologická konfirmace.

Na konfirmační systém je kladeno mnoho požadavků, které je potřeba splnit. Následující požadavky jsou zpracovány podle ČSN EN ISO 10012 [10]. Kvůli velkému rozsahu původních požadavků je uveden pouze zestručněný výběr, zaměřený spíše na praktické metrologické požadavky na úkor obecných procesních požadavků. K rozvedení a interpretaci požadavků normy [10] bylo také použito komentáře [50], který je na patřičných místech citován.

Na prvním místě stojí všeobecné požadavky, které se vztahují ke konfirmačnímu systému jako celku. Jsou to zejména tyto:

- a) Systém managementu měření musí zajistit splnění specifikovaných metrologické požadavky. Tyto vycházejí zejména z požadavků zákazníka a z interních požadavků organizace na produkci. Některé metrologické požadavky také vycházejí z legislativních předpisů. Požadavky se mohou například vyjádřit jako nejvyšší přípustná nejistota měření, rozsah, stálost, rozlišitelnost, podmínky prostředí nebo dovednost obsluhy.
- b) Organizace musí specifikovat všechny procesy měření a měřicí vybavení, které konfirmační systém pokrývá.
- c) Rozsah a hloubka konfirmačního systému vychází z rizik, které mohou nastat v důsledku chyb při plnění konfirmačních požadavků.
- d) Veškeré procesy, které jsou stanoveny, jako součást konfirmačního systému musí být řízeny.
- e) Veškerá měřicí zařízení v konfirmačním systému musí být podřízena metrologické confirmaci, která zajistí potvrzení jejich metrologických charakteristik.
- f) Změny v systému managementu měření musí řízeny podle nadřazeného systému řízení kvality dané organizace.

### **2.3.1 Odpovědnost managementu**

Hlavním předmětem zájmu managementu je zajištění takzvané *metrologické funkce*. Metrologickou funkcí se rozumí funkce s administrativní a technickou odpovědností za stanovování a uplatňování konfirmačního systému. Touto metrologickou funkcí musí být pověřena určitá organizační jednotka nebo určitý pracovník.

Metrologická funkce se nejčastěji zařazuje do organizační jednotky organizace, která se zabývá řízením jakosti, ale může být zařazena též do technického či výrobního úseku. Dle standardu [10] nebrání nic ani rozdělení této funkce mezi více organizačních jednotek, ale musí být zajištěna jejich dostatečná spolupráce.

Dle [50] se dají činnosti vymezené metrologickou funkcí definovat takto:

- a) Metodické i přímé řízení procesů měření, na základě požadavků stanovených cíly měření, dokumenty systému řízení jakosti, požadavky zákazníků. Všechny vstupní požadavky by měly být předmětem pravidelného přezkoumávání
- b) Návrh organizační i technické dokumentace z oblasti metrologie
- c) Spolupráce na zpracování dokumentace nadřazeného systému řízení jakosti

- d) Spolupráce na plánování a realizaci auditů systému řízení jakosti organizace, včetně přípravy podkladů pro tyto audity
- e) Realizace metrologické confirmace za pomoci vlastních či externích zdrojů, včetně metrologické návaznosti měřidel a výsledků měření
- f) Realizace procesů měření vlastními či externími zdroji
- g) Sledování výsledků měření, sloužící jako podklad pro případné odstraňování neshod
- h) Stanovení a dokumentace požadavků na personál podílející se na výkonu činnosti metrologické funkce
- i) Kontrola a rozvoj kvalifikace, dovedností a schopností personálu podílejícího se na metrologické funkci
- j) Zabezpečení jednoznačné identifikace měřidel, vedení záznamu o měřidlech, zajištění údržby a opravy těchto měřidel
- k) Zajištění neustálého souladu s legislativními požadavky
- l) Odstraňování neshod a sledování účinnosti přijatých opatření
- m) Prevence proti neshodám
- n) Rozvoj systému řízení měření

### 2.3.1.1 Zaměření na zákazníka

Charakteristickým rysem moderního řízení jakosti je orientace na zákazníka a toto platí i pro řízení jakosti měření. Základem je zajištění:

- Převedení a přezkoumání požadavků zákazníka na konkrétní metrologické požadavky. Tyto požadavky plynou ze smluv, nabídek či zaznamenaných jednání. Do přezkoumání spadá i analýza toho, zda je confirmační systém schopen požadavky splnit. Dokumentace požadavků zákazníka a komunikace s ním, je většinou náplní jiné organizační jednotky a je potřeba zajistit její spolupráci s jednotkou zajišťující metrologickou funkci.
- Splnění těchto metrologických požadavků
- Prokázání splnění těchto požadavků

### 2.3.1.2 Cíle jakosti

Management jakosti musí stanovovat měřitelné cíle, které musí také prosadit. Musí být stanovena kritéria kontroly plnění cílů a postupy, které povedou k naplnění cílů. Cíle je nutno čas od času upravovat a měnit v souvislosti s procesem neustálého zlepšování systému řízení měření. Řízení cílů má na starosti a odpovědnosti vedení metrologické funkce (např. hlavní metrolog).

Příklady možných cílů dle [10] a [50]:

- žádný neshodný produkt nesmí být přijat a žádný shodný produkt nesmí být zamítnut
- žádný proces spadající do confirmačního systému nesmí být neřízen déle než jeden den, aniž by to nebylo zjištěno
- všechny metrologické confirmace musí být dokončeny v dohodnutém termínu

- nesmějí existovat žádné nečitelné záznamy o metrologické konfirmaci
- všechny programy odborného školení musí být dokončeny podle stanoveného časového rámce
- čas, kdy měřicí vybavení není v provozu, musí být omezen na stanovené procento
- stanovené minimální počty účastí ve vhodných programech zkoušení způsobilosti (např. účast v kruhových testech)
- zavázání k nadstandardnímu využívání informací
- zavázání k využívání certifikovaných referenčních materiálů od určitých výrobců
- zavázání k trvalému souladu s určitými normativními dokumenty

### 2.3.1.3 Přezkoumávání systému managementu

Vedení musí zajistit systematické přezkoumávání efektivity systému řízení jakosti měření v plánovaných intervalech. Výsledky těchto přezkoumávání musí být zaznamenány a slouží jako podklad k modifikaci konfirmačního systému, včetně procesů měření a cílů jakosti. Přezkoumávání se provádí v pravidelných intervalech, ale i mimo ně. Předmětem přezkoumávání jsou zejména:

- vhodnost a plnění cílů řízení jakosti měření, zprávy od vedoucích a dozorových pracovníků, výsledky interních auditů, zaznamenané neshody, efektivita opatření (i preventivních) proti neshodám, výsledky účasti v programech způsobilosti, zpětnou vazbou od zákazníků (externích i interních), stížnostmi.

Tento výčet není konečný, přezkoumávání se musí zabývat všemi významnými faktory, které ovlivňují konfirmační systém. Těmito faktory mohou být ještě například lidské, materiální a informační zdroje a nástroje řízení jakosti.

## 2.3.2 Řízení zdrojů

Řízení zdrojů je podstatnou součástí konfirmačního systému a žádný ze vstupních zdrojů nesmí zůstat neřízen. Zdroje rozdělujeme podle druhu na lidské, informační a materiální. Do lidských zdrojů spadá veškerý personál, který přichází do kontaktu s konfirmačním systémem, řídí se zejména jeho odpovědnost a kvalifikace. Do informačních zdrojů řadíme veškeré postupy, dokumentaci, software, záznamy, ale i identifikaci. Mezi materiální zdroje pak počítáme veškeré měřicí vybavení, vzorky, referenční vybavení a ostatní hmotný majetek, se kterým řízení jakosti měření jakosti pracuje. Do materiálních zdrojů spadá i okolní prostředí.

### 2.3.2.1 Lidské zdroje

Musí být stanovena a dokumentována odpovědnost všech zaměstnanců začleněných v systému řízení měření. Je přípustné využití externích osob, ale jejich odpovědnost musí být také řízena. Odpovědnosti se mohou určovat v organizačním schématu, popisech práce, pracovních instrukcích nebo postupech. Je žádoucí co nejpodrobnější popis odpovědností, aby se zamezilo nejasnostem.

Popis odpovědnosti by měl dle [50] vždy obsahovat:

- odpovědnosti s ohledem na procesy měření

- odpovědnosti za hodnocení výsledků měření
- odpovědnosti za předkládání odborných stanovisek a interpretací
- odpovědnost za úpravu a vývoj pracovních postupů, popřípadě za jejich validaci
- odpovědnost za svěřené měřicí vybavení
- odpovědnost za udržování kvalifikace a závazky k jejímu zvyšování
- povinnosti a pravomoci plynoucí z řídicích funkcí

Podrobná specifikace odpovědností může být vhodným podkladem pro plánování a realizaci školení.

### 2.3.2.2 Informační zdroje

Mezi základní informační zdroj patří postupy. Postupy je zde myšleno jak obecné organizační postupy managementu měření, tak konkrétní technické postupy měření. Ty mohou být založeny na publikovaných normalizovaných metodách měření nebo na písemných instrukcích zákazníků nebo výrobců měřicího vybavení. Dokumentace ke všem postupům musí být schválená a dostupná.

Je žádoucí, aby dokumentace postupů konfirmačního systému byla součástí celkového systému řízení dokumentů dané organizace. Konkrétní informace o systému řízení dokumentů lze nalézt v [51]. Mezi dokumentované postupy patří zejména:

- zkušební postupy, postupy měření, postupy ověřování, postupy kalibrací, postupy seřizování a justování, postupy pro obsluhu měřidel a pomocného vybavení, včetně software, a jiné.

Zkušební postupy musí být validované. Hovoříme-li zavádění konfirmačního systému jako součásti systému řízení jakosti celého podniku, je třeba věnovat zvýšenou pozornost chápání a definování termínu *validace*. Existují totiž odlišnosti v definici validace z pohledu řízení jakosti podle norem ISO 9000 a z pohledu metrologie.

V metrologii se pod pojem validace či ověření často chápe jako metrologické ověření, které dle [32] a navazujících zákonů a vyhlášek zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření, nejčastěji pomocí kalibrace. V normě pro řízení jakosti [12] se termín ověření definuje v obecnějším smyslu. Je zde zmíněno, že ověřování je proces, při kterém se pomocí objektivních důkazů zjišťuje splnění specifikovaných požadavků. Validace je zde definována obdobně, pouze s tím, že se jedná o posouzení pro specifické zamýšlené použití. Dle [50] mohou tyto definice vzbuzovat dojem, že validace je podmnožinou ověření, i když tomu tak není. Ověření ještě neprokazuje, že jeho předmět bude vyhovovat různým aplikacím.

Dalším informačním zdrojem je software. Veškerý používaný software musí být identifikován, regulován a dokumentován. Před použitím nového softwaru nebo jeho revize musí být provedeno přezkoušení a validace (ve výše uvedeném smyslu). Je nutno zajistit integritu používaného software a také pravidelnou antivirovou kontrolu. Dále je nutno software bezpečně archivovat.

Třetím informačním zdrojem, o kterém se [10] zmiňuje, jsou záznamy. Je nutné mít zpracovaný systém, který zajistí vytváření záznamů, jejich identifikaci, uložení, ochranu a dobu uchovávání.

Hlavní zásady při práci se záznamy jsou: Čitelnost, dostupnost, zamezení neoprávněného přístupu a průhledné řízení chyb.

Posledním uvažovaným informačním zdrojem je identifikace. Identifikací se myslí označení veškerého vybavení a postupů používaných v systému řízení měření, jeho odlišení od ostatního vybavení organizace. Dále je třeba u přístrojového vybavení identifikovat stav metrologické konfirmace.

### 2.3.2.3 Materiální zdroje

Mezi základní materiální zdroj konfirmačního systému patří přístrojové měřicí vybavení. Toto přístrojové vybavení musí být dostupné a musí mít platnou kalibraci. Je třeba stanovit systém pro příjem, výměnu, opravu, dopravu, skladování, odeslání měřicího vybavení. Také je třeba zabránit zneužití a možnému poškození, či změnám metrologických charakteristik měřidla. Musí být pevně stanoveno, pro jaký účel je měřidlo určeno a nesmí být využíváno k žádnému jinému účelu. Kalibrace měřicího vybavení může být realizována jinou organizací, než která vykonává metrologickou funkci.

V dokumentaci přístrojového vybavení nesmí dle [50] chybět:

- název výrobce, identifikace typu, sériové číslo (nebo jiná jednoznačná identifikace); informace dokládající, že položka vybavení se ve shodě se specifikovanými metrologickými požadavky; umístění položky vybavení; informace o tom, kdo má tuto položku v užívání; návody k použití, popřípadě odkaz na jejich umístění, údaje o všech metrologických konfirmacích a o datu příští kalibrace; plán údržby a informace o dříve prováděné údržbě; záznamy o poškození, špatné funkci, úpravě či opravě.

Do materiálních zdrojů zahrnujeme též okolní prostředí. Podmínky prostředí ovlivňující měření musí být dokumentovány, monitorovány a zaznamenávány. Případné korekce založené na podmínkách měření musí být zaznamenány a aplikovány na výsledky měření.

Konkrétní podmínky prostředí, které mohou ovlivňovat měření, jsou např. teplota, rozsah změny teploty, vlhkost, prašnost, osvětlení, vibrace, elektromagnetická interference. Výrobce obvykle specifikuje faktory, které mohou měření ovlivnit a udává jejich přípustné rozsahy.

### 2.3.3 Metrologická konfirmace

Již v úvodní 1. kapitole byla metrologická konfirmace definována, jako soubor činností požadovaných k zajištění takového stavu měřidla, aby vyhovovalo zamýšlenému používání. Tato obecná definice naznačuje, že „soubor činností“ bude dosti rozsáhlý a na jednotlivé činnosti budou kladeny určité nároky.

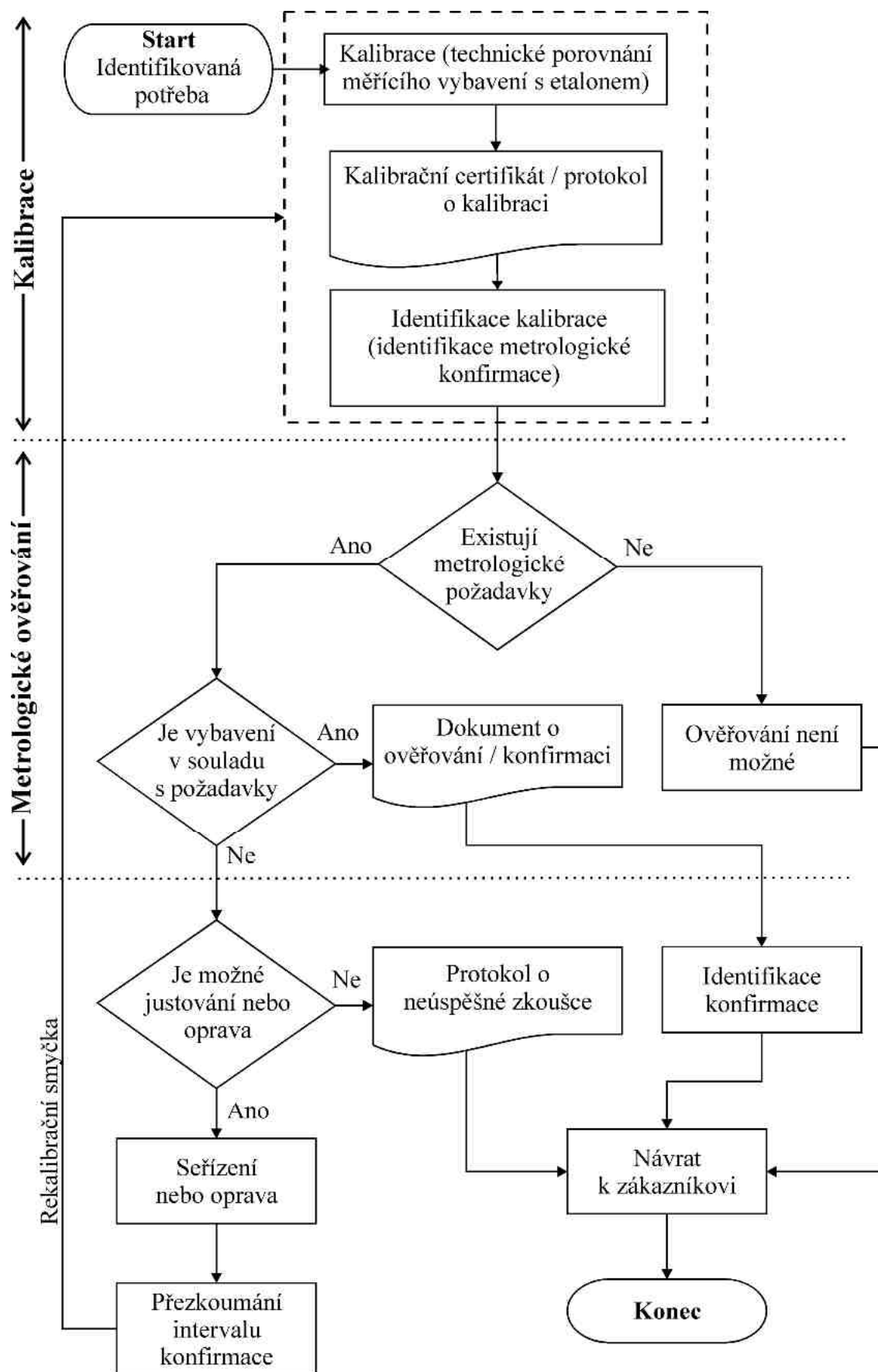
V [10] je definice metrologické konfirmace upřesněna ještě následujícími poznámkami:

- Metrologická konfirmace obecně zahrnuje kalibraci, ověřování, jakékoli nezbytné seřízení nebo opravu a následnou rekalibraci, porovnání s metrologickými požadavky na zamýšlené použití vybavení, stejně jakékoli požadované zapečetění a označení štítkem.
- Metrologické konfirmace se nedosáhne, dokud nebude prokázána a dokumentována vhodnost měřicího vybavení pro zamýšlené použití.

- Požadavky na zamýšlené použití zahrnují takové úvahy, jako je rozsah, rozlišení a největší dovolené chyby.
- Metrologické požadavky na měřicí vybavení se obvykle liší od požadavků na produkt a nejsou v požadavcích na produkt specifikovány.

Tímto jsou jako hlavní položky souboru činností specifikovány zejména kalibrace, ověřování, justování, dokumentace, identifikace a skladování měřicích přístrojů. Neméně důležitý je fakt, že požadavky na certifikační systém, a tedy i jeho položky, závisí na požadavcích na produkt. Produktem je v tomto případě myšlen výsledek měření. Požadovaná přesnost měření tedy ovlivní metrologickou certifikaci.

Na následujícím Obr. 13 je znázorněno schéma celého procesu metrologické certifikace, které osvětluje souvislost jeho jednotlivých částí.



Obr. 14: Proces metrologické konfirmace měřící techniky (zpracováno dle [10])



Základní součástí metrologické confirmace je sledování metrologických charakteristik měřidla a jejich udržení v požadovaných mezích. Příkladem těchto charakteristik může být:

- rozsah, chyba správnosti opakovatelnost, stálost, hystereze, drift, vlivy ovlivňujících veličin, rozlišitelnost, práh pohyblivosti a citlivosti, chyba a mrtvé pásmo.

Tyto metrologické charakteristiky je potřeba vyjadřovat kvantitativně, což je samozřejmé, neboť celý confirmační systém se snaží o kvantitativní řízení jakosti procesu měření. Metrologické charakteristiky se sledují proto, že přispívají k výsledné nejistotě měření, pomocí které se posuzuje shoda s metrologickými požadavky. Definici jednotlivých metrologických charakteristik lze nalézt v [52].

Dále je třeba mít na paměti, že v ČR jsou záležitosti týkající se metrologické confirmace regulovány prostřednictvím zákona o metrologii [32]. Ten rozlišuje následující typy měřidel:

- etalony
- pracovní měřidla stanovená (obvykle označovaná jen jako stanovená měřidla)
- pracovní měřidla nestanovená (nestanovená měřidla)
- certifikované referenční materiály, pokud jsou určeny k funkci etalonu, stanoveného měřidla nebo pracovního měřidla

Pracovní měřidla stanovená jsou měřidla, která stanovil ÚNMZ a která podléhají povinnému ověřování, kdežto nestanovená pracovní měřidla a etalony podléhají kalibraci.

Součástí metrologické confirmace je také kontrola přístupu k měřicímu vybavení a zabezpečení proti neoprávněnému justování. To znamená systém plomb a také pokyny pro případ jejich narušení. Tato opatření samozřejmě nezahrnují běžná uživatelská justování, jakým je například nastavení nuly. Řízení kontroly přístupu a justování se musí uplatňovat i v případě používaného softwaru.

Důležitou součástí metrologické confirmace jsou záznamy. Ty musí mít všechny náležitosti definované v [10], zejména se jedná o jednoznačné datování, schválení, udržování a dostupnost. Záznamy musí obsahovat zejména:

Popis a jednoznačnou identifikaci výrobce zařízení, typ, výrobní číslo, atd.; datum, kdy byla dokončena metrologická confirmace; výsledek metrologické confirmace; ukončený interval metrologické confirmace; určený interval metrologické confirmace; identifikaci postupu metrologické confirmace; stanovené největší dovolené chyby; odpovídající podmínky prostředí a rozhodnutí o všech nutných korekcích; nejistoty zahrnuté v kalibraci vybavení; podrobnosti o údržbě, jako je seřízení, opravy, nebo prováděné modifikace; jakákoli omezení v používání; identifikaci zaměstnanců, provádějících metrologickou confirmaci; identifikace zaměstnanců odpovědných za správnost zaznamenaných informací; jednoznačná identifikace jakýchkoli kalibračních certifikátů a protokolů o kalibraci a jiných odpovídajících dokumentů; důkaz o návaznosti výsledků kalibrace; metrologické požadavky k zamýšlenému použití; výsledky kalibrace získané po, a pokud je to nutné, také před jakýmkoli seřízením, modifikací nebo opravou [10].

### 2.3.3.1 Intervaly mezi metrologickou konfirmací

Stanovení četnosti metrologických konfirmací je důležitou součástí konfirmačního systému. Návrh konfirmačních intervalů totiž ovlivňuje spolehlivost, s jakou konfirmační systém opravdu zajišťuje správnost a přesnost měření.

Nejdůležitějšími faktory pro návrh konfirmačních intervalů jsou zejména: typ měřidla, doporučení výrobce, informace získané na základě předchozích konfirmací měřidla, záznamy o opravách a údržbách, četnost a rozsah používání měřidla, četnost kontrol měřicích funkcí měřidla, reálné podmínky okolního prostředí, opotřebením měřidla, drift, atd.

Výčet těchto faktorů vzbuzuje dojem, jakoby konfirmační intervaly závisely na stejných faktorech jako intervaly kalibrační. Tento dojem není od věci, protože návrh obou intervalů má opravdu stejný základ, zejména se projeví měřicí vybavení (hlavně míra užívání) a požadovaná spolehlivost. Pokud chceme spolehlivější výsledek, musíme provádět kalibraci/konfirmaci častěji. Konfirmační systém obsahuje kalibraci jako svojí podmnožinu a zajišťuje daleko více procesů, takže není možno automaticky položit rovnítko mezi kalibrační a konfirmační interval. Je ale pravda, že kalibrační intervaly jsou běžně dostatečně krátké na to, aby bylo v možno v případě stejně dlouhých konfirmačních intervalů zajistit spolehlivost celého konfirmačního systému. Ve své podstatě by konfirmační interval neměl být delší než kalibrační, protože výsledky kalibrací jsou jeho důležitým vstupem. Jediný problém může tedy nastat v případě, že přesnost měřicích přístrojů a nutnost jejich kalibrace není tím hlavním faktorem v měřicím systému. To může nastat v případě, kdy jsou k dispozici dostatečně přesné a stále přístroje, ale výsledek měření může být i přesto negativně ovlivňován dalšími dynamickými prvky měřicího systému, jako je například fluktuace zaměstnanců, úpravy zpracování dat, atd. Ve většině případů může být konfirmační interval shodný s kalibračním (viz [40]).

V současné době platný standard ČSN EN ISO 10012 [10] neuvádí žádný podrobnější návod pro určování konfirmačních intervalů, ale pokud nahlédneme do jeho předchozí verze 10012-1:1993 [17] (dnes již neplatné), tak v informativní příloze nalezneme celkem podrobné informace týkající se návrhu konfirmačních intervalů. Nová verze normy nevypouští tyto informace z důvodu zastaralosti, ale z důvodu zobecňujícího trendu v normalizaci. Novější verze standardů vypouštějí prakticky všechny podrobnější informace a dávají přednost systémovému přístupu.

Následující výčet metod návrhu konfirmačních intervalů je zpracován dle [17].

Existují dvě základní a protichůdná kritéria, která se mají porovnávat při určování konfirmačních intervalů pro každou položku měřicího zařízení a sice:

- nebezpečí, že měřicí zařízení, které se používá, přestane vyhovovat specifikaci, má být co nejmenší
- náklady na konfirmaci mají být minimální

Na počátku je třeba určit výchozí konfirmační interval. Při tomto kroku hrají velkou roli zejména zkušenosti toho, kdo délku intervalu navrhuje. Tyto zkušenosti se těžko nějak kvantifikují a v současné době neexistuje žádný jednoduchý a spolehlivý návod, jak správně navrhnout konfirmační interval. Ten, kdo interval navrhuje, musí mít dostatek zkušeností z dané oblasti měření, musí dobře znát typ používaných přístrojů a měl by mít zkušenosti s návrhem konfirmačních intervalů z předchozí praxe. Faktory, které při návrhu hrají nejdůležitější roli, jsou:

- doporučení výrobce zařízení
- rozsah a intenzita používání
- vliv okolního prostředí
- žádaná přesnost měření

Po počátečním nastavení konfirmačních intervalů je potřeba je dále přezkoumávat a případně upravovat. Systém, který by fungoval pouze s počáteční délkou konfirmačního intervalu, se nemůže považovat za dostatečně spolehlivý, nehledě na zkušenosti osoby, která interval navrhla a informační základnu, která byla vzata v úvahu. To, že systém funguje, neznamená automaticky, že funguje se stejnou spolehlivostí. Takže pozitivní výsledek konfirmace neznamená, že po celé období do další konfirmace bude zajištěna požadovaná přesnost měření. Je třeba shromáždit informační výstupy z aktuální konfirmace a dle nich popřípadě upravit konfirmační interval. Je třeba vždy zvažovat rizika případných neshod vzniklých příliš krátkým konfirmačním intervalem a náklady na konfirmaci.

Existuje několik metod, které lze pro přezkoumávání konfirmačních intervalů použít. Volba metody závisí na tom, zda:

- jsou zařízení ošetřována jednotlivě nebo ve skupinách
- položky přestaly vyhovovat příslušným specifikacím vlivem driftu po uplynutí určité doby nebo používám
- jsou údaje dostupné, a zda se přikládá důležitost minulým kalibracím zařízení

Žádná metoda není všeobecně použitelná a následující přehled metod jen ukazuje různé přístupy v různých případech. Nejlepší způsob je, vybrat metodu podle konkrétní situace a případně ji ještě modifikovat, podle svých zkušeností a specifických požadavků. Metody nastíněné v [17] jsou:

- a) Metoda automatického (stupňovitého) justování
- b) Metoda regulačních diagramů
- c) Metoda časového rozvrhu
- d) Metoda doby používání
- e) Metoda zkoušení během užívání nebo metoda černé skříňky

a) Metoda automatického justování je velice jednoduchá. Jedná se o úpravu podle výsledků konfirmace. Když je negativní, tak se interval prodlouží, když se naopak zjistí, že vše je v toleranci, tak se interval prodlouží. Velikost kroku pro zvyšování a snižování intervalu se musí určit podle specifické situace. Velkou nevýhodou této metody je fakt, že pracuje s velkým rizikem, že konfirmace nezajistí správný a přesný výsledek po prodloužení konfirmačního intervalu. Tato metoda je vhodná pro práci s jednotlivými položkami měřicího systému, což klade velké požadavky na plánování, protože konfirmace každé položky zvlášť narušuje chod měřicího úseku organizace.

b) Metoda regulačních diagramů je již podle názvu statistickou metodou. Pracuje se s výsledky konfirmace, které se po získání dostatečné historie dat vynesou do časových řad a následně statisticky zpracovávají. Pro větší měřicí systémy je třeba pracovat s automatickým zpracováním dat. To, že je tato metoda přezkoumávání konfirmačních intervalů statistická sebou přináší výhody i nevýhody. Výhodou je objektivnost, možnost vysledování trendů, které nejsou na první pohled patrné a

v neposlední řadě možnost výpočtu teoretické spolehlivosti konfirmačního systému. Nevýhodou je nutnost dostatečné historie dat a slepota statistických metod. V praxi bývá někdy požadavek i na minimální historii dat problémem, protože konfirmační interval je v řádu měsíců a dost často dochází k morálnímu nebo technickému zastarání měřicího vybavení dříve, nežli se nám ho povede pomocí statistických metod zvládnout. Slepota statistických metod je myšlen fakt, že statistika pouze zpracovává data a dává výsledky. Neříká nám nic o tom, zda byla zadána dobrá data, zda byla použita správná statistická metoda, či jestli jsme úplně neopomenuli nějaký důležitý faktor. To sebou přináší riziko špatných rozhodnutí a nikdy bychom neměli přikládat výsledkům této metody přehnanou váhu jen z toho důvodu, že je to „spočítáno“.

c) Metoda časového rozvrhu pracuje se skupinami měřicího zařízení s různými délkami konfirmačních intervalů. Měřicí zařízení se do těchto skupin rozčlení podle očekávané spolehlivosti a stálosti. Po provedení konfirmace se stanoví počet položek, které nevyhověly, přičemž se nezahrnou položky, které nevyhověly z důvodů, které délka konfirmačního intervalu nemůže ovlivnit. Pokud podíl v dané skupině výrobků přesáhne definovaný podíl, zkrátí se konfirmační interval pro celou skupinu. Jestliže se ukáže, že se nějaká zvláštní podskupina zařízení nechová jako ostatní zařízení ve skupině, je třeba ji přeřadit do jiné skupiny. V případě je podíl neshodných zařízení nulový nebo velice nízký, lze zvážit prodloužení konfirmačního intervalu pro tuto skupinu.

d) Metoda doby užívání je vlastně variantou ostatních metod. Vezme se jakákoliv metoda a modifikuje se tak, že se sleduje přímo využití jednotlivých položek měřicího systému v hodinách. Nezkoumají se tedy kalendářní měsíce, po které bylo zařízení v měřicím systému, ale doba jeho reálného využití. Nejlepší je nějaká forma automatického měření doby využívání zařízení spolu s indikací potřebné konfirmace. Tato modifikace má sice na první pohled výhodu v tom, že respektuje míru užívání měřicího vybavení, což je jeden z hlavních faktorů určování konfirmačních intervalů, ale přináší také řadu nevýhod. Jsou to zejména:

- metoda nerespektuje pasivní součásti měřicího řetězce, které stárnou, i když nejsou využívány
- metoda nerespektuje možné vlivy manipulace při skladování, či vlivy některých úkonů, jako je rychlé opakované zapínání a vypínání přístrojů nebo přetěžování
- metoda požaduje větší množství časoměřičů, což znamená větší náklady, problémy s jejich umístěním, obsluhou a také kontrolou
- je těžké tuto metodu zařadit do plánovacího a logistického systému, neboť není známo datum, kdy konfirmační interval skončí

e) Metoda černé skříňky doplňuje předchozí metody a slouží k včasné indikaci neshody. Jedná se vlastně o průběžnou kontrolu, pomocí dalšího zařízení, které testuje sledované parametry. Na jedné straně je to výborný postup, jehož hlavní výhodou je odhalení neshod, které vznikly náhodným poškozením přístroje, které nemohl konfirmační systém ovlivnit. Neshody jsou odhalovány rychle a ještě před samotným měřením. Nevýhodou jsou časové nároky na úkon kontroly měřicího přístroje. U složitějších systémů je návrh černé skříňky náročnější. Čím složitější černá skříňka, tím je větší pravděpodobnost, že se sama porouchá. Je tedy potřeba zajišťovat i kontrolu samotného kontrolního zařízení.

### 2.3.4 Proces měření

Procesy měření, které jsou součástí systému managementu měření, musí být plánovány, validovány, zavedeny, dokumentovány a řízeny. Veličiny ovlivňující proces měření musí být zajištěny [10].

Z hlediska konfirmačního systému musíme v souvislosti s procesy měření řešit tři problémy, a to problém návrhu, problém realizace a problém záznamu procesu.

Návrh měřicího procesu musí splňovat platné legislativní zákony spolu s vnitřními předpisy realizujícího subjektu a vychází z metrologických požadavků zákazníka. Každý z jeho prvků musí být identifikován a musí pro něj být určen způsob jeho řízení. Celý návrh procesu měření musí být zpracován tak, aby předcházel nesprávným výsledkům měření a aby zajišťoval okamžitou nápravu zjištěných nedostatků.

Při návrhu procesu měření je prvním nejdůležitějším krokem vymezení požadavků, které na jeho jednotlivé části klademe. V současné době se při zjišťování požadavků na proces měření postupuje v deseti krocích (Zpracováno dle materiálů NASA [16]):

1. Účel měření – Co chceme měřit, jaká spolehlivost je požadována a jakou konfidenci bude mít rozhodnutí učiněné z naměřených dat.
2. Návrh parametrů měřicího systému – Definování parametrů měřicího systému, které jsou potřeba pro dosažení cílů měření. V této fázi musí být definována cílová spolehlivost a hladina konfidence.
3. Technické parametry měřicího systému – Definování funkcí a vlastností systému, které popisuje požadavek na parametry měřicího systému v předchozím kroku. Vlastnosti musí být definovány pomocí parametrů měřicího vybavení a provozní spolehlivosti.
4. Parametry prvků měřicího systému – Musí být definovány funkce a vlastnosti každého prvku tvořícího měřicí systém. Tyto vlastnosti musí být popsány v hodnotách parametrů konkrétních položek měřicího systému.
5. Parametry měření – Definování měřicích charakteristik, které vyplývají z předchozích bodů, definují se tolerance parametrů měření a musí být definována hladina konfidence, odpovídající provozní spolehlivosti měřicího systému z bodu 3.
6. Požadavky na proces měření – Definování hodnot parametrů měření, rozsahů, tolerancí, maximálních nejistot, konfidenčních hladin a měřicích intervalů, které by odpovídaly požadavkům bodů 2, 3 a 4.
7. Návrh měřicího systému – Musí se definovat proces uspořádání hardwarového a softwarového měřicího vybavení, který by vedl k realizaci systému splňujícího požadavky bodu 6.
8. Požadavky na kalibrační proces – Definování kalibračních parametrů měření, rozsahů, maximálních nejistot, konfidenčních hladin, kalibračních intervalů, které by zajišťovaly vlastnosti měřicího systému tak, že by odhalovaly a odstraňovaly nebo kontrolovaly růst nejistoty.
9. Návrh kalibračního systému – Definování uspořádání čidel, převodníků, detektorů, měřidel, zdrojů, generátorů, zátěží, zesilovačů, mostů, omezovačů, filtrů, přepínačů, atd. do kalibračního systému. Definice musí obsahovat kalibrační metody a procesy pro zajištění integrity dat.

10. Požadavky na návaznost měření – Definice zlepšujícího se kalibračního procesu a procesu, který zajistí nepřerušenu návaznost na národní a mezinárodní metrologický systém.

Po určení požadavků následuje podrobný návrh a jeho realizace. Podrobný popis celého postupu návrhu nového měřicího procesu včetně analýzy jeho realizace přesahuje rámec této disertační práce. Je třeba ale zmínit, že v mnoha případech se nový proces nenavrhuje a použije se již existující návrh procesu měření, který je normalizovaný nebo alespoň validovaný některým renomovaným odborným sdružením či organizací. K tomu je dle [50] potřeba dodat, že ani validované metody nelze ihned bez ověření v provozních podmínkách aplikovat. Je třeba nejdříve ověřit, že jsme schopni danou metodu aplikovat tak, aby dávala správné výsledky.

Co se týká záznamů procesů měření, tak pro ty platí podmínky, které byly zmíněny v kap. 2.3.2.3., která se věnovala materiálním zdrojům. Krom toho [10] explicitně zmiňuje nutnost udržování záznamů získaných z procesů měření, včetně všech informací týkajících se nejistoty měření.

### **2.3.5 Nejistota měření a návaznost**

Dle [10] musí být nejistota odhadována pro každý proces měření zahrnutý v systému managementu měření. Musí být identifikovány všechny zdroje nejistoty a provedena jejich analýza a návrh výpočtu nejistoty, ještě před samotnou metrologickou confirmací a před validací procesu měření.

Protože velká část této disertační práce se nejistotou zabývá, není nutné na tomto místě opakovat informace týkající se nejistoty měření a jejího vyčíslování. Vše podstatné lze nalézt v kap. 2.1 a 3.1.

V souvislosti s vyjadřováním a zabezpečováním přesnosti měření je nutné zmínit problematiku návaznosti. Management metrologické funkce musí zajistit, aby všechny výsledky měření byly návazné na etalony jednotek SI a je také povinen informace o této návaznosti uchovávat. Je požadována co nejvyšší možná míra odbornosti při zabezpečování nepřerušeno řetězce návaznosti a proto se zpravidla požaduje, aby pracoviště, která toto zajišťují, pracovala podle standardu [11].

Existují případy, ve kterých je obtížné návaznost prokázat. Mohou to být například některá NDT měření. V takových případech je prokazování návaznosti neprovádí přes nepřerušeno řetězec navázání na jednotky SI, ale skrze pravidelnou účast ve vhodném programu zkoušení způsobilosti.

### **2.3.6 Tvorba konfirmačního systému**

Konfirmační systém je třeba vybudovat, řídit a neustále udržovat. První zásadní věcí, kterou je nutno zmínit, je fakt, že konfirmační systém nelze vybudovat jen na základě normativních a legislativních požadavků. Tyto tuto oblast pouze regulují a svými požadavky napomáhají ke správnému utváření a udržování systému managementu měření. Tento fakt lze vysvětlit na příkladech. Hodně zjednodušeným příkladem může být například konzerva s ovocem. Zákony stanovují obsah zakázaných látek a nakládání s potravinami, čímž chrání spotřebitele, standardy popisují možné použité materiály a postupy, které pomáhají s návrhem a realizací obalu a procesu balení. Ale ani nastudování všech legislativních a standardizačních pramenů nám nedá ve výsledku postup, kterým budeme konzervy navrhovat, vyrábět a kontrolovat. To vše si musíme navrhout sami. Jen při tom musíme zachovat soulad s platnými zákony a

standardy, které vyžaduje zákazník či vnitřní podniková norma. Podobně je to s budováním systému kvality. Kdyby bylo možno jen na základě informací z norem rodiny ISO 9000 vybudovat fungující systém řízení kvality, nebylo by tolik rozdílných filozofií, odborných sporů a utajování know-how. Pro pochopení může posloužit jednoduchá analogie návrhu automobilu: Pokud máme navrhnout auto podle platných standardů, musíme to umět. Jenom podle bezpečnostních standardů totiž žádné auto navrhnout a vyrobit nelze.

Předchozí příklady snad objasnilo vztah mezi reálným certifikačním systémem a požadavky, které byly zmíněny v předchozích kapitolách. Byly to zejména požadavky ISO standardů [10], [6] a [12] a zákona o metrologii [32]. Požadavky byly v příslušných kapitolách okomentovány se záměrem ukázat cesty pro návrh certifikačního systému v praxi.

Komplexní návod pro vybudování certifikačního systému není možno vypracovat, už z toho důvodu, že procesy měření se budou významně lišit podle oblasti aplikace a požadované přesnosti. Z metrologického hlediska je nejpodstatnější částí certifikačního systému kalibrace a vyjadřování přesnosti měření. Jakým způsobem tyto oblasti řídit a vyřešit možná úskalí, to rozebírají kap. 3.1 a 3.2 v následující části této disertační práce.

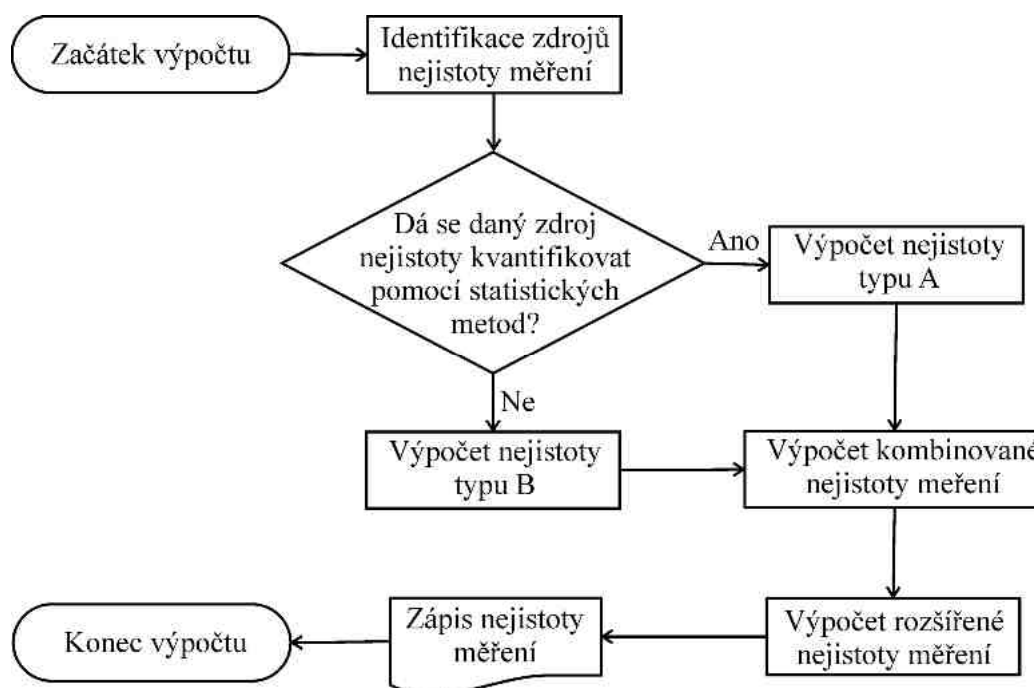
### 3 ŘEŠENÍ PROBLÉMŮ VZNIKAJÍCÍCH PŘI ZABEZPEČOVÁNÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ

#### 3.1 Nejistota měření

Pro výpočet nejistoty je podstatný účel, pro který výsledek měření vyjadřujeme. Výpočet se bude lišit pro měření orientační, průmyslová, laboratorní a pro high-tech aplikace. Pro řadu potřeb dostačuje vyjadřování nejistoty, tak jak bylo popsáno v kapitole 2.1, ale pro náročná řešení, jakými je například kosmický či zdravotnický výzkum, je nutné vyřešit problémy, které byly v kapitole 2.1 identifikovány. Sofistikovaně vyjádřená nejistota není samozřejmě potřeba jenom při výrobě vesmírných sond nebo umělých orgánů. Je potřeba všude tam, kde je potřeba velmi vysoká spolehlivost výsledků. Termínem velmi vysoká spolehlivost se dnes již přestává označovat interval  $3\sigma$  a začíná se hovořit o  $4\sigma$ , tedy o 99,9936% pravděpodobnosti. Ta je zpravidla vyžadována tam, kde má selhání zařízení velký bezpečnostní nebo finanční dopad. V těchto případech je výpočet nejistoty již mnohem komplikovanější záležitost, proto již nelze výpočet tolik zjednodušovat. Zjednodušení nejsou možná nejen proto, že za některých předpokladů je nelze použít, ale zejména proto, že by jejich vlivem nejistota vycházela tak vysoká, že by stejně nebyla použitelná. Právě v náročných aplikacích je důležité vědět, jakou hodnotu má měřená veličina. Při zjednodušování zjistíme, že výsledek s velmi vysokou pravděpodobností leží v nějakém intervalu, přičemž ten interval bude tak velký, že vyjádřený výsledek je ekvivalentní výroku: Hodnota měřené veličiny „určitě“ „někde“ leží. Proto je nutné se do budoucna zjednodušení vzdát i za cenu větších obtíží při výpočtu. Následující kapitoly se zabývají problematickými kroky výpočtu nejistoty, které byly identifikovány k kapitole 2.1.

##### 3.1.1 Postup vyjadřování nejistoty měření

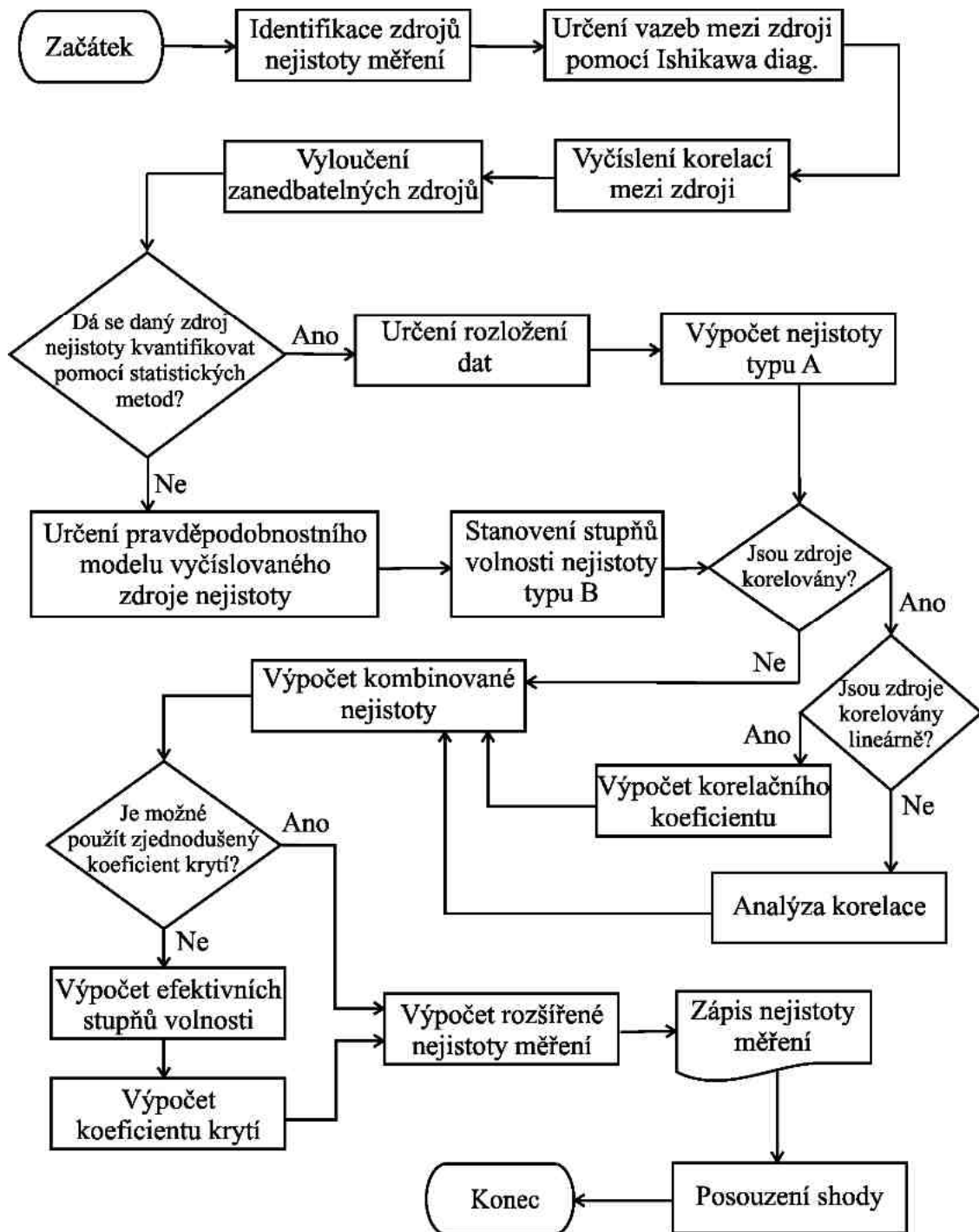
Postup vyjadřování nejistoty měření, se dá popsat následujícím vývojovým diagramem.



Obr. 15: Postup vyjadřování nejistoty měření



Vývojový diagram zobrazený na Obr. 15 je velice schematický a nepostihuje hlavní problematické kroky, které byly popsány v kapitole 2.1. Pokud postup rozepíšeme a zobrazíme všechny jeho důležité podčásti, tak získáme následující vývojový diagram.



Obr. 16: Vývojový diagram výpočtu nejistoty měření se všemi důležitými prvky

Jednotlivé části tohoto diagramu tvoří kroky, kterými se bude zabývat následující text v rámci kapitoly 3.1.

### 3.1.2 Určování a popis zdrojů nejistoty

Identifikace všech podstatných zdrojů nejistoty měření je základním předpokladem pro celkové hodnocení přesnosti a spolehlivosti výsledků měření. Pokud některý významný zdroj opomeneme, nebo některý zdroj špatně kvantifikujeme, tak to zásadním způsobem ovlivní výslednou nejistotu měření, která pak nemusí odpovídat požadované spolehlivosti. Proto je potřeba proces identifikace zdrojů nejistot systematizovat, aby k takovýmto pochybením nedocházelo. Postup s diagramem příčiny a následku popsany v kapitole 2.1.3 je vhodným řešením, ale jeho použití má dvě zásadní úskalí.

1. Tato metoda nenachází přes svoji univerzálnost široké uplatnění, a to zejména proto, že neexistuje dostatek dostupných praktických návodů pro její použití pro určování zdrojů nejistoty. Často je k dispozici pouze doporučení pro použití této metody, nebo jenom bodové vysvětlení. K odstranění tohoto nedostatku by měl přispět postup popsany dále v této kapitole.

2. Tato metoda je sice obecně použitelná pro každý měřicí proces, ale i v případě dostupných a podrobně zpracovaných postupů užití Ishikawa diagramu pro určování zdrojů nejistoty, se nepředpokládá masivní rozšíření. V praktických měřeních nebude většina personálu ochotna tento diagram konstruovat. Je to z toho důvodu, že konstrukce je zdoluhavá a není samospásná. Vždy je třeba mít hlubší znalost měřicí úlohy. Na základě této znalosti a zkušeností dokáže kvalifikovaný personál identifikovat zdroje nejistoty rychle a dostatečně spolehlivě. Přesto je třeba do tohoto procesu zavést systematičnost.

Jako optimální řešení se jeví hlubší zpracování metodiky pro identifikaci zdrojů nejistoty. Prvním krokem je vždy sumarizace všech zdrojů, které na základě zkušeností a teoretický úvah připadají v potaz. V každé specifické oblasti měření totiž působí různé zdroje nejistot. Sestavený seznam zdrojů by měl sloužit hlavně v případech, kdy si nejsme jisti, jaké zdroje nejistoty působí. V tom případě doporučuji projít položku po položce a uvažovat, zda se tento zdroj nebo z něj odvozené zdroje na výsledné přesnosti měření nepodílí.

V praxi, např. ve výrobě se pro danou měřicí metodu vybere konkrétní seznam působících zdrojů a při praktickém měření se již jenom zvaží míra vlivu těchto zdrojů a překročí se rovnou k jejich kvantifikaci. Popřípadě se na základě obecného seznamu může vytvořit podrobný seznam nejistot danému měření přímo na míru a při analýze zdrojů nejistot se již bude kontrolovat pouze tento seznam.

V další kapitole je podrobněji rozepsána problematika tvorby diagramu a následku a pak následuje shrnutí hlavních zdrojů nejistoty měření a vytvoření navrhovaného seznamu zdrojů nejistot.

#### 3.1.2.1 Konstrukce diagramu příčin a následků pro zdroje nejistoty měření

Diagram příčiny a následku se konstruuje postupně od „hlavy“ virtuální ryby (konečného následku), tedy od sumy všech vlivů, které na měření působí. Pak se postupuje po možných příčinách a příčinách těchto příčin.

Při analýze zdrojů nejistot je důležité si nejprve formulovat kompletní matematický vztah pro zkoumanou veličinu. Jednotlivé parametry této rovnice budou tvořit hlavní větve konstruovaného diagramu. Dále se musí krok po kroku projít měřicí metody a zahrnout její vliv. Každá větev diagramu se dále větví na přispívající podfaktory a tak podrobně, dokud jejich vliv nebude zanedbatelný. Dále se odstraní

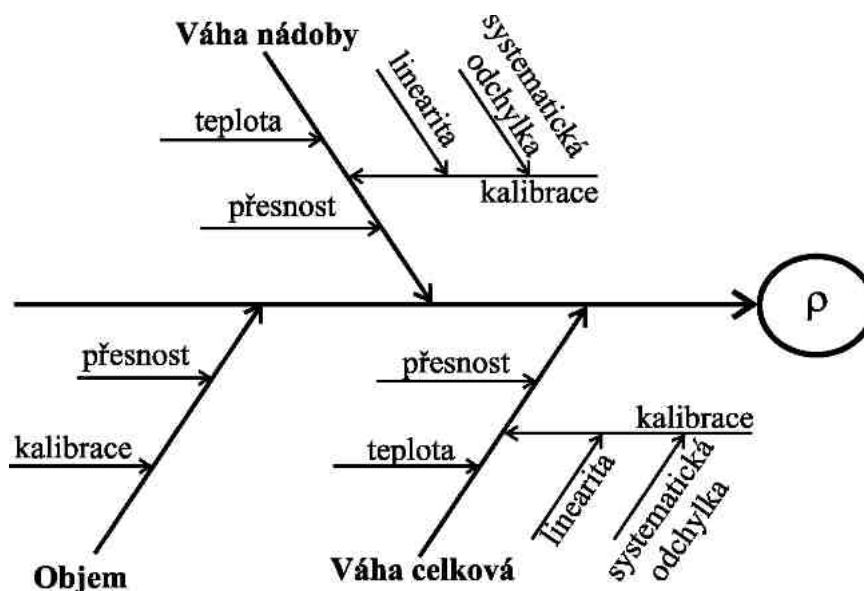
duplikované položky a přeskupí a ujasní se všechny vlivy, jak již bylo popsáno v kap. 2.1.3. Také se mohou vyskytnout vlivy, které se navzájem vyruší.

Tento postup nepovede vždy ke stejnému seznamu jednotlivých zdrojů nejistoty, ale přesto by měl vést k tomu, že se podstatné zdroje identifikují, ať již jakkoliv pojmenovány a sdruženy. Proto je Ishikawa diagram jako metodika identifikace zdrojů nejistot efektivní [31]. Cesta k výsledku bude vždy jiná, ale měla by vést vždy k odhalení všech podstatných zdrojů nejistoty.

Celý postup lze ukázat na jednoduchém příkladě, který je zpracován dle [31]. Cílem měření je změřit hustotu kapaliny tak, že zvážíme její známý objem v nádobě, kterou zvlášť zvážíme. Potom se hustota kapaliny vypočítá podle vztahu:

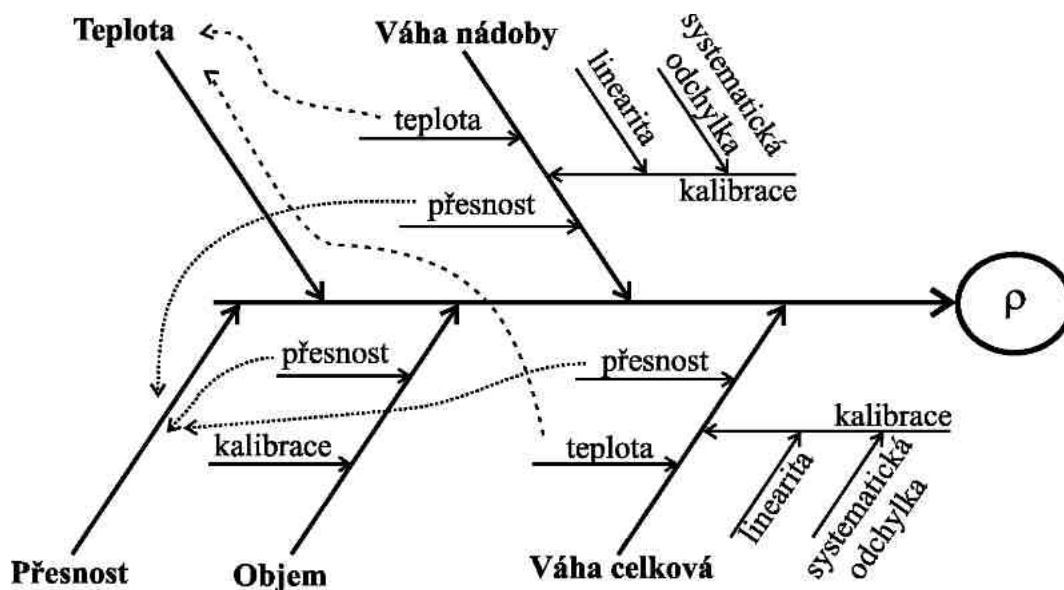
$$\rho = (m_{\text{celková}} - m_{\text{nádoby}}) / V,$$

kde  $\rho$  je zjišťovaná hustota,  $m$  je váha a  $V$  je známý objem kapaliny. V tomto případě se uplatní pouze tři vlivy: Kalibrace měřicího vybavení, teplota a přesnost jednotlivých měření.



Obr. 17: Diagram příčiny a následku – krok 1

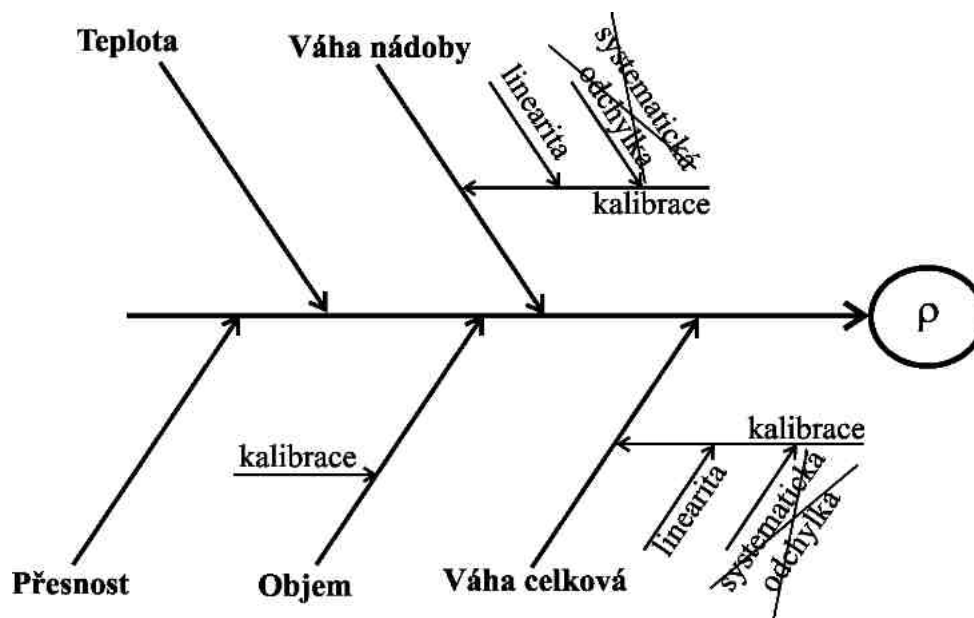
Na Obr. 17 je vidět diagram příčiny a následku jako hierarchická struktura, která se spojuje do jednoho výstupu – do zjišťované nejistoty hustoty. Větve, které vedou k tomuto výstupu, jsou podílející se vlivy, což zahrnuje výsledky měření, ale i další faktory, jako například okolní prostředí. Každá větev se může dále větvit do dalších podvlivů. Tyto jednotlivé vlivy zahrnují všechny faktory, které ovlivňují výsledkem měření, ať již jsou proměnné nebo konstantní. Nejistoty těchto faktorů se podílejí na výsledné nejistotě výsledku měření. V našem případě tvoří hlavní větve diagramu přímo parametry rovnice pro výslednou veličinu. Na odvětvích je 2x teplota, 3x kalibrace a 3x přesnost.



Obr. 18: Diagram příčiny a následku – krok 2

Na Obr. 18 je vidět sloučení přesnosti a teploty do společných skupin. Toto je možné, pokud zdroje mají stejný následek a působí ve stejný čas. Můžeme předpokládat, že teplota má stejný vliv na hustotu a že jednotlivé přesnosti ve výsledku dají dohromady rozptýl hodnot, který přísluší celé měřicí metodě.

Na následujícím diagramu zobrazeném na Obr. 19 je zobrazena možnost odstranění systematických odchylek. To je možné z toho důvodu, že tyto dva vlivy se vyruší, pokud se obě měření provedou stejnou váhou za stejných podmínek.



Obr. 19: Diagram příčiny a následku – krok 3

Zbývající větve týkající se kalibrace se mohou zjednodušit na svůj jediný prvek a to linearitu. Obě linearity se podílejí různou měrou na výsledku, a proto nemůžou být sduženy dohromady. Společně s kalibrací objemového měření utváří nejistotu celkového měření hustoty.

### 3.1.2.2 Praktický návod pro identifikaci zdrojů nejistot

Při snaze identifikovat zdroje nejistoty postupujeme od zjevných vlivů k podrobnějším příčinám.

Pokud například zjistíme korelační analýzou, že měření ovlivňuje teplota, tak nás to samozřejmě povede k tomu, že budeme měřit teplotu. Důležitá otázka ale je: Proč měření ovlivňuje teplota? Může to být například proto, že se roztahuje měřený materiál. V tom případě nás bude zajímat např. koeficient délkové roztažnosti, který musíme zjistit. Další postup analýzy je možný, ale vždy je třeba se zastavit na rozumné mezi, kdy už by další odhalené podpříčiny přinášely jen komplikovanější výpočet a přitom by reálně neovlivnili výslednou nejistotu. Stanovení této hranice je obtížné a nejpraktičtější postup je, co nejpodrobnější analýza a výpočty u první realizace měření. Při dalším opakování v podobných podmínkách lze na základě těchto primárních vyčíslení nejistot zanedbat zdroje, které se na celkovém výsledku neprojeví, poněvadž jejich projevy budou převáženy projevy silnějších zdrojů.

Například u zmíněné teploty se může stát, že nepřesnost jejího stanovení (pokud figuruje ve vztahu pro výstupní veličinu) bude o dva až tři řády menší než vliv nepřesnosti měřicího přístroje jiné vstupní veličiny. Vliv nepřesnosti stanovení teplotního součinitele může mít vliv ještě o několik řádů menší.

Konstrukce diagramu příčin a následku ale není jen nástrojem pro suché vyhledání zdrojů, které budou nebo nebudou zanedbány s ohledem na jejich přínos k celkové nejistotě. Měl by to být živý nástroj a s odhalenými zdroji nejistot by se mělo dále pracovat. Odhalené zdroje by měly být vstupem pro další analýzu měřicí metodiky. V případě zmiňované teploty se například můžeme ptát: Je stejná teplota prostředí, kterou měříme a teplota měřeného tělesa? Nezahřívá se měřené těleso vlivem měření? Takovéto otázky nás mohou vést ke změně měřicí metodiky nebo k vyčíslení nepřesnosti této metodiky.

Standardní určované větve vlivů jsou:

- vliv lidí
- vliv strojů
- vliv materiálů
- vliv okolního prostředí
- vliv metodiky

Při konstrukci diagramu příčin a následku se na metodiku často zapomíná

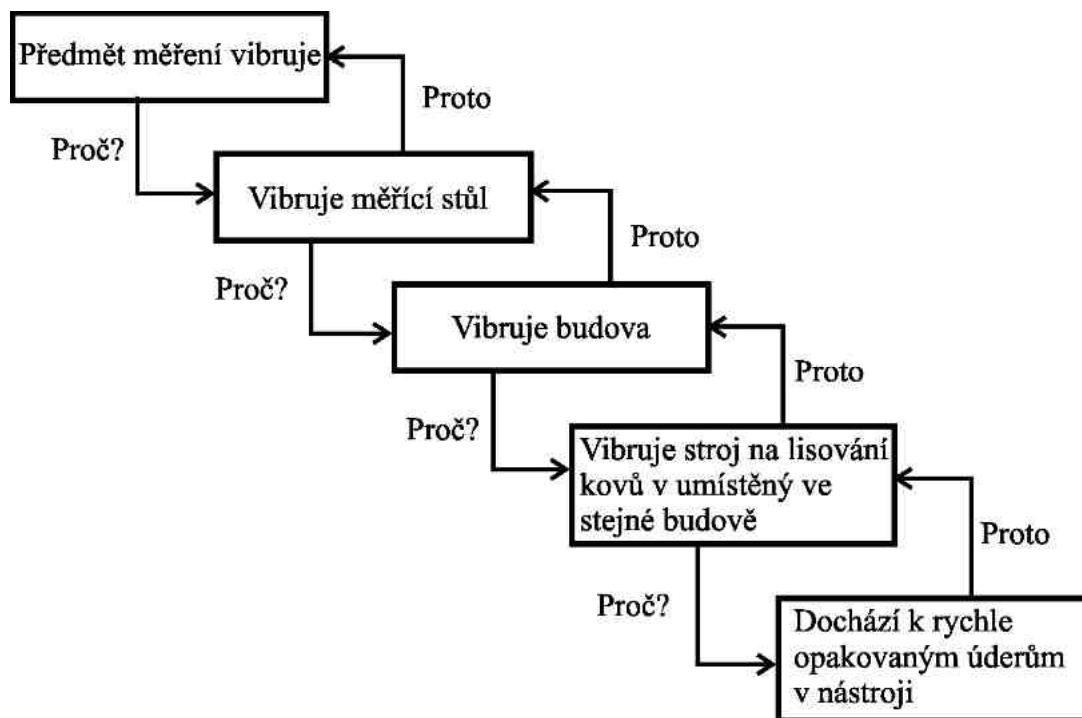
V rámci přípravy této kapitoly jsem prošel desítky Ishikawa diagramů konstruovaných k různým typům měření a často jsem se setkal s tím, že větev „vliv metodiky“ byla prázdná. To je dle mého způsobeno tím, že přímý kvantifikovatelný vliv metodiky na výslednou nejistotu nebývá vždy zřejmý a pokud se diagram konstruuje metodou „co mě napadne“ popř. „co napadne tým“, tak dochází k přehlédnutí některých vlivů. Neznamená to, že metoda brainstormingu je pro vyhledání zdrojů nejistot nepoužitelná. Je tomu právě naopak – zkušený tým touto metodou dokáže rychle identifikovat hlavní zdroje. Ale tyto informace je potřeba dále analyzovat. Krom dalšího postupu analýzy směrem k podpříčinám, je třeba ptát se „Proč?“. Proč daný zdroj působí? Odpovědi na otázky „Proč?“ je pak potřeba dále analyzovat. Tato analýza zpravidla vede i k identifikaci nejistot zapříčiněných metodikou.

Tzv. metoda 5-Why, při které se pětinasobným opakovaným kladení jednoduché otázky „Proč?“ dostáváme až ke kořenu problému, je při hledání zdrojů nejistot ideálním pomocníkem pro dohledání podpříčin v jednotlivých větvích Ishikawa diagramu.

Zde je třeba podotknout, že ne vždy je potřeba odpovědět na otázky „Proč“ pětkrát. Dostatečné odpovědi se můžeme dobrat dříve, což koresponduje s již zmíněným faktem, že od určité úrovně nemá cenu zdroje nejistot dále analyzovat, protože jsou zanedbatelné.

V postupu „Proč?“ se nemusíme ubírat jen směrem naznačeným na příkladu s teplotou, tedy – vliv teploty, vliv délkové roztažnosti, vliv krystalické mřížky, atd. Při použití této metodiky postupujeme cestou identifikace opravdových příčin namísto teoretického rozboru působících zdrojů. To znamená, že nás ani tak nezajímá to, že teplota tělesa souvisí s kmitáním jeho částic, ale spíše ten fakt, že teplota se mění, poněvadž místnost, kde se měří, je průchozí nebo v ní dochází k cirkulaci vzduchu z jiného důvodu.

Postup 5-Why může být vysvětlen např. na situaci, kdy měření ovlivňují vibrace působící na diagnostikovaný objekt. Diagram 5-Why by pak mohl vypadat takto:



Obr. 20: Použití metodiky 5-Why pro dohledání příčiny analyzovaného jevu

Řešením může být a) odizolování měřicího stolu, b) přemístění měření do jiné místnosti, c) přemístění stampingového stroje nebo d) změna frekvence lisování. Lze použít i kombinace těchto bodů.

Tímto se dostáváme k důležitému bodu a to k odstraňování zdrojů nejistot. Nemělo by docházet k tomu, že pouze postupujeme stylem: Identifikace zdroje nejistoty -> kvantifikace jeho vlivu. Celá řada identifikovaných zdrojů nejistoty se dá odstranit. Namísto složitého vyčíslování nejistoty, která zdroji přísluší, tak dojde k úplné eliminaci zdroje, nebo k jeho potlačení na zanedbatelnou míru. Pak dojde k zpřesnění měření a zároveň ke zjednodušení výpočtu nejistoty.

Pokud tedy zjistíme, že na měření má vliv změna teploty, tak její stabilizace je racionálnějším krokem, nežli vyšetřování jejích změn a přesného vyčíslení vlivu na výsledek měření.

Platí tedy, že po identifikaci zdrojů nejistot se musí nejprve určit, proč vlastně tyto zdroje mají na výsledek měření vliv. To pomůže k odhalení skrytých vlivů metodiky měření. Poté musí následovat snaha o alespoň částečnou eliminaci všech působících vlivů. Kvantifikace příslušných nejistot je až posledním krokem.

Při identifikaci zdrojů nejistot může posloužit metoda 5-Why, ale musíme si dát pozor na její přímočarost, která sice pomůže odhalit kořen problému, ale může také přispět k přehlédnutí některých významných vedlejších vlivů. Proto musíme metodiku kombinovat s Ishikawa diagramem.

### 3.1.2.3 Systematizování zdrojů nejistot

Při analýze zdrojů nejistoty se dopracujeme k různým příčinám, které se liší významem. Pokud budeme provádět tuto analýzu opakovaně pro další a další měření, tak zjistíme, že některé zdroje se často opakují. Dokonce i ty zdroje, které jsou specifické pro daný měřicí přístroj, se objevují v lehké variaci u jiných měření. Z toho vyplývá, že je možné sestavit takový seznam zdrojů nejistot, ve kterém by se nacházely všechny druhy zdrojů, které mohou být významné.

Problém je v tom, že seznam všech možných příčin pro všechny známé principy sestaveny jenom jedním člověkem nebo týmem bude vždy neúplným základem, který je třeba rozšířit. Je to dáno tím, že nikdo nemá, ani nemůže mít detailní praktické zkušenosti z oblasti všech měřicích metod. Z tohoto důvodu si tato disertační práce ani neklade za cíl vypracovat jakýkoliv seznam zdrojů nejistot v širší míře, než jak je naznačeno v teoretické kapitole 2.1.3.

To, že jeden člověk nemůže identifikovat všechny možné zdroje nejistot, ale neznamená, že sestavení kompletního v praxi použitelného seznamu není možné. Je pouze třeba kontinuálně získávat informace od různě zaměřených odborníků, a tyto informace uchovávat a třídit. Hierarchie a vazby mezi jednotlivými zdroji nejistot jsou totiž a) věcí náhledu a za b) budou se měnit s tím, jak se bude seznam rozšiřovat.

Zůstává problém správy takového seznamu zdrojů nejistot. V dnešní době má know-how velmi vysokou hodnotu a většina komerčních subjektů není ochotná sdílet informace. Na druhou stranu poptávka po informacích je velká. Jenomže vytvoření seznamu zdrojů nejistot překračuje hranice organizací a oborů, a jeho vytvoření je možné pouze a) velkou národní nebo mezinárodní organizací nebo b) společným úsilím jednotlivých subjektů na příklad formou spolupráce moderovanou či nemoderovanou online databází. Základním předpokladem je spolupráce a sdílení informací.

Je možné, že se tímto směrem bude vývoj v budoucnu ubírat, ale předpokládám překážky hlavně v pochopení formulací v takovémto to živém univerzálním seznamu zdrojů nejistot. Jakmile přestane být v záplavě velkého množství popsaných zdrojů patrné, co se kterým vlastně myslí, nebo toto odlišení bude vyžadovat komplexní studium celého seznamu, tak je jasné, že v konečném důsledku by byla unikátní analýza nakonec účinnější než univerzální seznam. V souvislosti s rozšiřováním možností informačních technologií a sdílení informací může být ale cesta systematizování poznatých zdrojů nejistot nakonec hybným směrem vývoje. Toto prokáže až čas a může to být předmětem dalšího zkoumání, které by však již překračovalo rámec této disertační práce.

### 3.1.3 Výpočet nejistoty typu A

Vyčíslování nejistoty typu A je na první pohled bezproblémová záležitost. Při podrobnějším zkoumání však vyvstávají problémy. Jedním sporným bodem může být rovnice pro odhad rozptylu (2.4). Při výpočtu rozšířené nejistoty měření dle (2.27) reflektujeme množství dat, ze kterých byl učiněn odhad nejistoty typu A. V případě menšího počtu dat zvyšujeme koeficient krytí, abychom zajistili požadovanou úroveň konfidence. Musíme si ale uvědomit, že podobnou operaci rozšíření provádíme také při odhadu rozptylu dle vztahu (2.4). Je ale vynásobení členem  $(1/(n-1))$  oprávněným rozšířením? Tuto otázku si již položilo mnoho statistiků. Mezi nimi i prof. V. Čermák, který v [64] problém blíže analyzuje a dochází k překvapivému závěru, že v některých případech by bylo vhodnější použít členu  $(1/(n+1))$ . Na tuto práci reaguje v [65] známý český statistik prof. J. Anděl, který uvádí, že správným členem pro výběrový rozptyl je spíše  $(1/n)$ .

V uvedených publikacích [64] a [64] jsou uvedeny názory obou stran, přičemž argumentace vyznívá lépe pro člen  $(1/n)$ . Praxe a názory odborníků však zůstávají nadále na straně výpočtu doporučeného dle [4] tedy  $(1/(n-1))$ . To mi potvrdil i prof. J. Tošenovský [70].

Názory se tedy různí a teoretické odvození je obtížné. Finální rozřešení je třeba ponechat specializovaným statistikům. Přesto je možno posoudit, jaké by použití všech třech navrhovaných variant mělo vliv na výslednou nejistotu měření.

Zkoumané vztahy pro odhad směrodatné odchylky, respektive rozptylu jsou tedy:

$$s_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.1)$$

$$s_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.2)$$

$$s_3 = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.3)$$

Pro posouzení použitelnosti použijeme umělé generace náhodných čísel podle známého rozložení. Výhoda spočívá v tom, že budeme přesně znát parametry rozložení, což je v praxi v podstatě nemožné. Pro generaci jsem zvolil statistický aparát programu Matlab [71]. Generátor náhodných čísel v tomto programu není dokonalý, a podle bližšího zkoumání v práci [72] nevyhověl pro opakované generování posloupnosti podle normálního rozdělení. Ve zmiňované práci [72] je ale také zmíněno, že problémy se začnou projevovat až při větším počtu dat v základním souboru (řádově milióny a výše). Při reálných měřeních máme problém opačný – zajistit dostatečný počet měření (řádově alespoň kolem 30). Proto je pro naše účely generátor náhodných čísel v Matlabu dostačující.

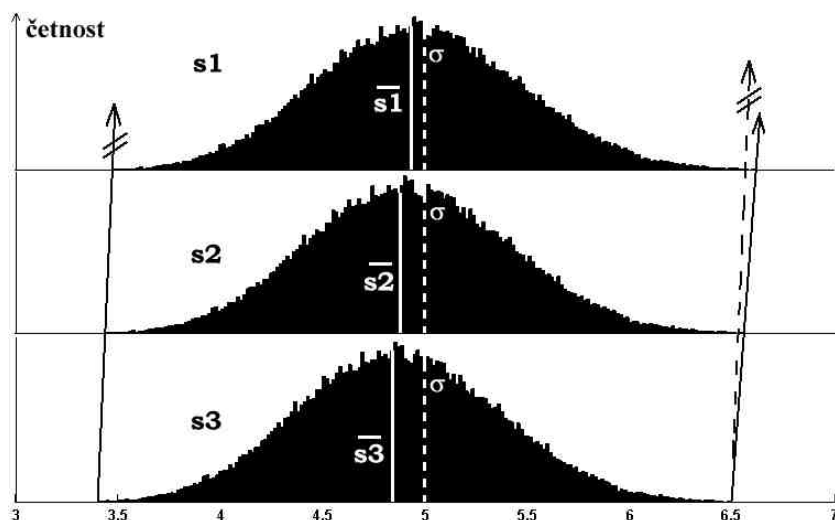
Pro základní posouzení zvolíme střední hodnotu sledovaného procesu  $\mu = 100$  a směrodatnou odchylku  $\sigma = 5$  (V tomto i dalších porovnáních budeme uvažovat bezrozměrnou veličinu)

Jisté je, že pokud jsou data generována podle náhodného rozložení, a vypočteme-li z vygenerovaného souboru průměr a výběrovou směrodatnou odchylku,



tak při několikanásobném opakování dostaneme soubor průměrů a výběrových směrodatných odchylek, který by měl být také normálně rozdělen.

Následující grafy na Obr. 21 byly vypočteny pro všechny zmíněné druhy výběrových směrodatných odchylek, tedy pro  $s_1$ (3.1),  $s_2$  (3.2) i pro  $s_3$  (3.3). Počet opakování byl zvolen 100 000. Není to sice dostatečný počet pro to, abychom dostali dokonalé normální rozložení, ale pro účel porovnání tří druhů směrodatných odchylek je to dostačující. Velikost zkoumaného souboru byla zvolena 60 dat (měření). Z hlediska metrologie je to dostatečný počet dat, při kterém můžeme použít statistický aparát s vysokou konfidencí.



Obr. 21: Histogram výběrových směrodatných odchylek vypočtený ze 100 000 krát opakované generace a analýzy šedesáti prvkového souboru dat

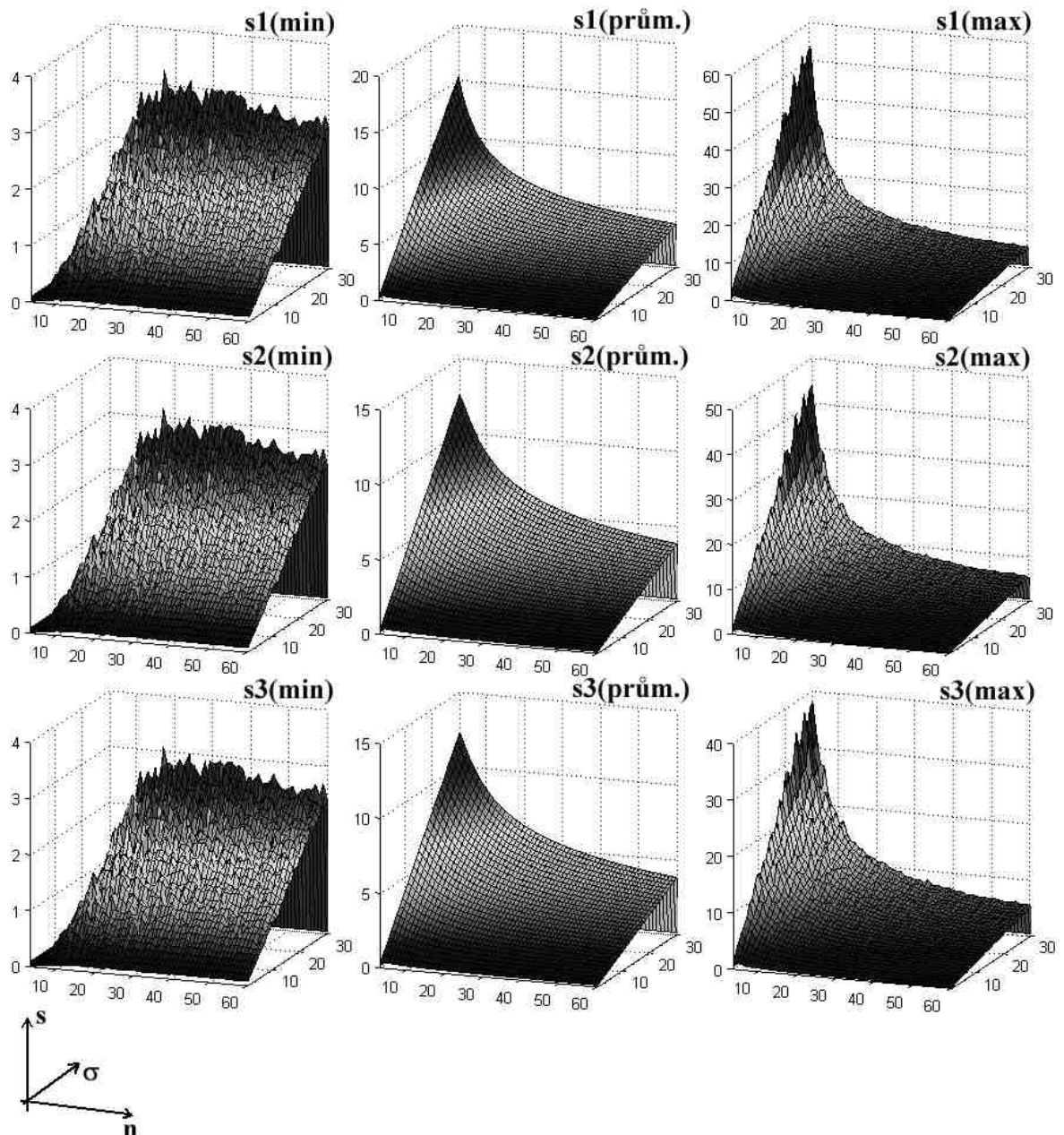
Zobrazené histogramy demonstrují to, co vyplývá ze vzorců (3.1), (3.2) a (3.3). Jednotlivé výběrové směrodatné odchylky jsou získávány vynásobením různě velkým číslem, je tedy nejen posunuta střední hodnota, ale také měřítko. Teoreticky by při nekonečném opakování mělo vyjít  $s_2$  totožné s původním  $\sigma$ . Opakované simulované pokusy však prokázaly, že posunutí směrem doprava patrné na Obr. 21 není náhodné, nýbrž při počtu opakování 100 000 a více je tento posun pravidlem. Možnou příčinou by kromě nedokonalého generátoru náhodných čísel mohl být fakt, že pro všechny výpočty byl použit stejný soubor základních dat. Systematická odchylka se tedy projeví ve všech třech posuzovaných vztazích. Z Obr. 21 na první pohled vyplývá, že pro odhad směrodatné odchylky se jeví nevhodnější vzorec (3.1). Problém není ale tak jednoduchý. Ostatní dva vzorce (3.2) a (3.3) sice jeví větší posun od původní hodnoty, ale zato mají o něco menší rozptyl. Nemůžeme také jenom jednoduše posuzovat  $s_1$ ,  $s_2$  a  $s_3$  protože to jsou jenom střední hodnoty zaznamenaných odhadů a jednotlivé odhady se často vyskytují v celém intervalu 3,5 – 6,5.

Můžeme provést alespoň relativní porovnání výsledků, protože pro všechny tři vzorce byla použita stejná data. Z analýzy znázorněných dat vyplývá celkem jednoznačně, že  $s_1$  je oproti  $s_2$  nadsazena a  $s_3$  zase zmenšena. Na první pohled vypadá nadsazení pomocí členu  $1/(n-1)$  logicky. Protože máme k dispozici omezený počet hodnot, a tedy může vyjít výběrová směrodatná odchylka menší než původní  $\sigma$ , tak je určité rozšíření na místě. Při nekonečném počtu měření přejde  $s_1$  do tvaru  $s_2$  a vše nasvědčuje, že tvar  $s_1$  je pro praxi ten nejpoužitelnější. Tomu by ostatně odpovídal i Obr. 21 na kterém se  $s_2$  nejvíce blíží  $\sigma$ . Musíme si však uvědomit, že zvýšení

intervalu, tak aby byl na patřičné hladině konfidence, se při výpočtu nejistoty provádí při výpočtu rozšířené nejistoty pomocí koeficientu krytí. Není tedy násobení členem  $1/(n-1)$  nadbytečné? A nebylo by nakonec možné použít rovnici  $s_3$ , jakou doporučuje lit. [64]?

Pro posouzení všech třech zmíněných vzorců je třeba provést analýzu pro různé počty vzorků a různé rozptyly sledovaného procesu. Pro následující rozbor byly zvoleny tyto hodnoty – střední hodnota  $\mu = 100$ , směrodatná odchylka zkoumaného procesu,  $\sigma = 1 - 30$  a počet vzorků  $n = 3 - 60$ . Velikost střední hodnoty byla zvolena 100 proto, že pak směrodatná odchylka odpovídá přímo procentům ze střední hodnoty. Rozmezí  $\sigma = 1 - 30$  odpovídá reálné situaci při posuzování měřicích procesů. Je sice pravda, že směrodatná odchylka je často menší než jedna a fakticky je pro velkou část měření blízká nule, ale v tom případě většinou převáží ve výsledku nejistota typu B, a proto není analýze menších hodnot tak zajímavá. Naopak větší hodnoty než  $\sigma = 30$  ukazují spíše na potřebu změnit měřicí metodiku. Dolní hranice počtu uvažovaných vzorků byla zvolena  $n = 3$ , protože takto nízký počet se často z ekonomických a časových důvodů používá, i když není pro statistiku a metrologii dostatečný.

Pro všechny kombinace parametrů  $n$  a  $\sigma$  bylo provedeno 20 000 opakování. Tak malý počet byl zvolen kvůli časové náročnosti výpočtu, který v této fázi analýzy slouží pouze pro orientaci. Kvůli nízkému počtu opakování nejsou zaznamenané průběhy hladké. Přesto je z nich však patrná funkční závislost.

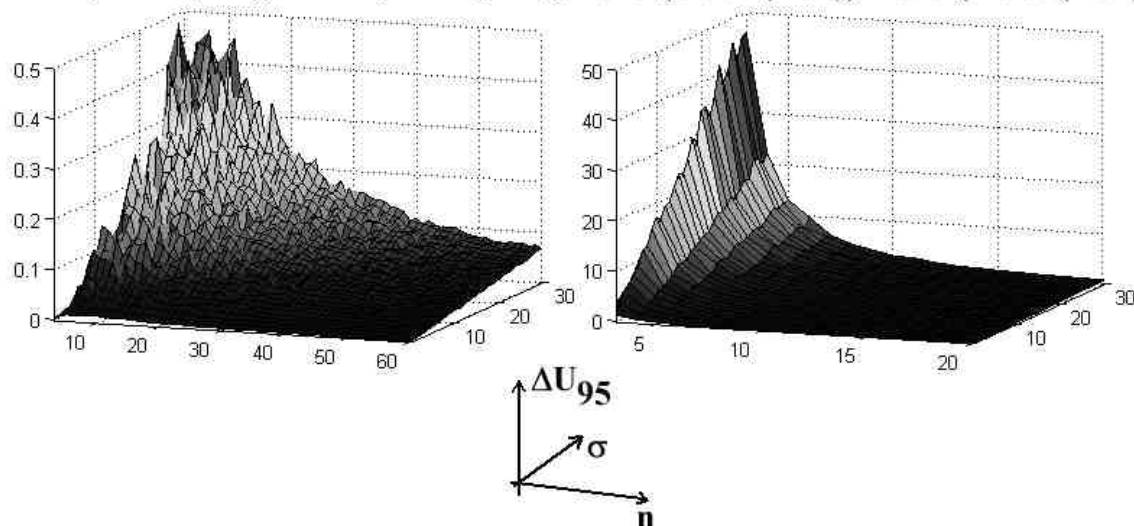


Obr. 22: Závislost výběrové směrodatné odchylky  $s$  na počtu naměřených dat  $n$  a původní směrodatné odchylce  $\sigma$ .

Na Obr. 22 je zachycena jak průměrná hodnota jednotlivých výběrových směrodatných odchylek, tak také maximální a minimální zaznamenané hodnoty. Z grafu je vidět jedna zásadní věc, minimální odhady  $s_1$ ,  $s_2$  a  $s_3$  se příliš neliší. A minimální hodnoty jsou nejkritičtější, protože v žádném případě nechceme směrodatnou odchytku podhodnotit. Na první pohled by to vypadalo, že nejlepší by měl být vzorec (3.3), při jehož použití nebude docházet k nadhodnocování a přitom je skoro rovnocenná se vztahy (3.1), (3.2) v oblasti minimálních hodnot. To samozřejmě není pravda, protože a) nezáleží pouze na minimální hodnotě, ale na pravděpodobnosti se kterou vyjde směrodatná odchyłka podhodnocená. A za b) z této fáze nelze činit závěry, důležitá je až rozšířená nejistota, která reflektuje použité koeficienty krytí. Je sice pravda, že rozšířená nejistota bude přímo z výběrové směrodatné odchylky vyplývat (viz Obr. 23), ale pro závěrečné posouzení je třeba použít konkrétní vypočítané střední hodnoty a

rozšířené nejistoty spočítané z každého jednotlivého opakování – kterých musí být více než 20 000, abychom mohli výsledky spolehlivě posoudit z hlediska pravděpodobnosti. 20 000 opakování je sice z hlediska průměrné hodnoty dostatečné z hlediska relevantních dat, ale další analýzu, která by měla z vypočtených hodnot učinit závěry, nelze založit na statistickém rozboru, už jenom proto, že bychom museli počítat další výběrovou směrodatnou odchylku. To vzhledem k tomu, že se snažíme zanalyzovat právě proces výpočtu směrodatné odchylky zkoumat, není možné.

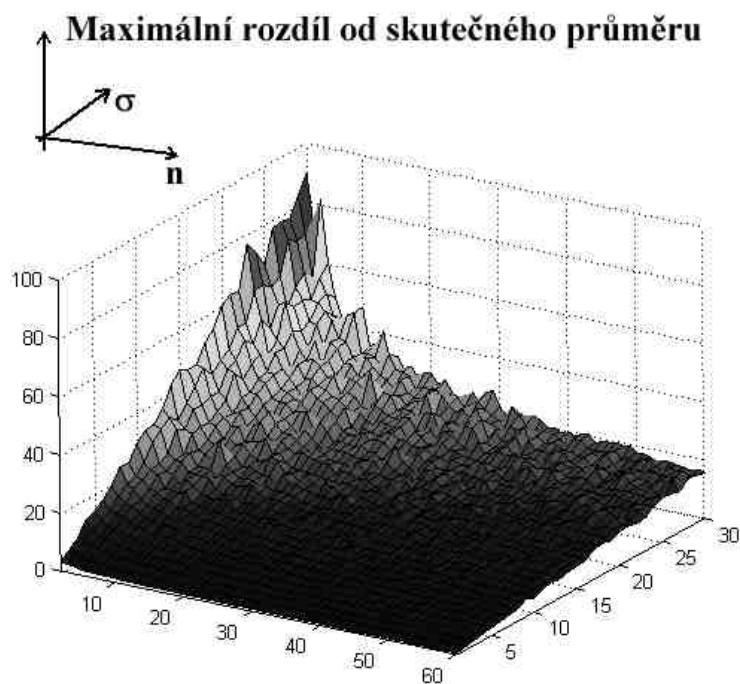
**U95 (dle S1(min)) - U95 (dle S3(min))    U95 (dle S1(max)) - U95 (dle S3(max))**



*Obr. 23: Rozdíl minimálních a maximálních rozšířených nejistot vypočítaných podle dvou rozdílných metod výpočtu směrodatné odchylky*

V grafech na Obr. 23 je zobrazen rozdíl dvou výpočetních metod. Rozšířená nejistota byla stanovena pro  $p = 95\%$ , a byly tedy již zahrnuty odpovídající koeficienty krytí podle vzorce (2.27). Při menších počtech měření a výraznější variabilitě naměřených hodnot je rozdíl velice významný. Pokud hovoříme o maximální hodnotě, jakou můžeme vypočítat, tak se pohybujeme v rozdílu dokonce až 20-30% sledované pravé veličiny. Menší nejistota měření je samozřejmě lepší, ale jenom za podmínky, splňuje-li vůbec základní požadavek na nejistotu – tedy obsahuje-li interval vytýčený průměrnou naměřenou hodnotou a rozšířenou nejistotou měření pravou hodnotu s požadovanou pravděpodobností.

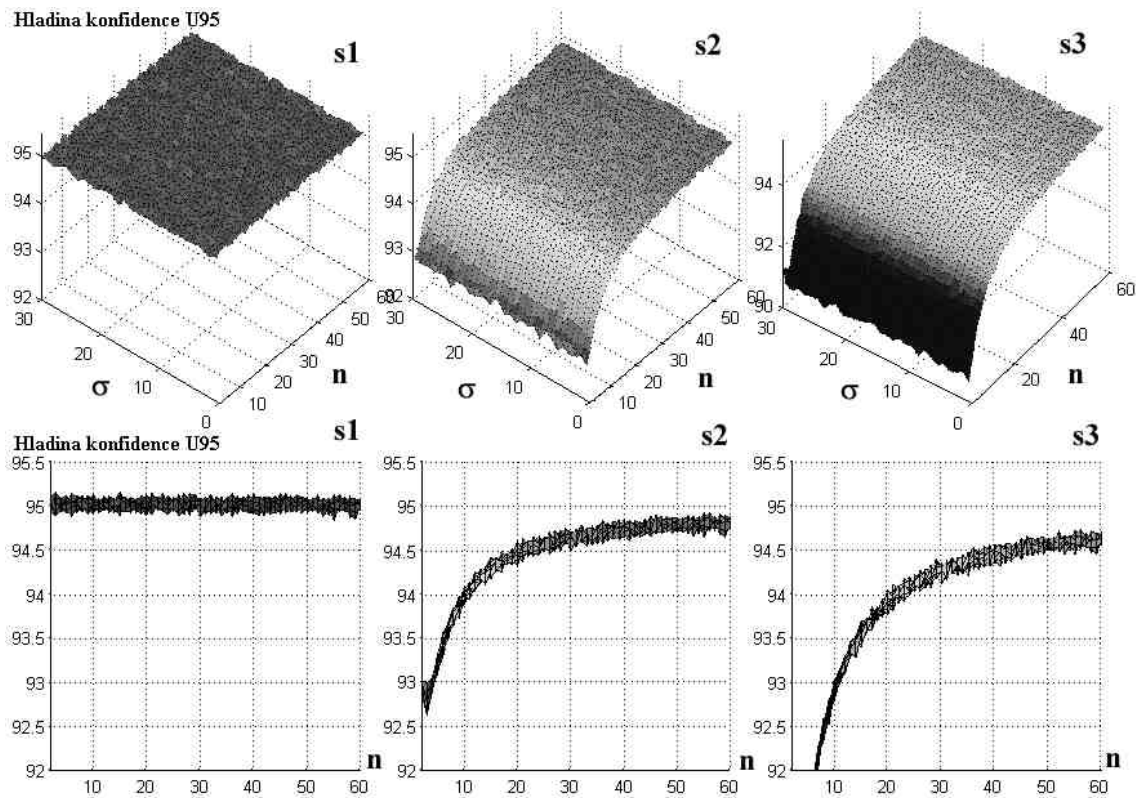
K posouzení tohoto faktu musíme vzít v úvahu i střední hodnotu naměřených hodnot. Ta se samozřejmě také může, a bude lišit od původní střední hodnoty sledovaného procesu. Na Obr. 24 je znázorněna maximální zjištěná odchylka vypočteného průměru od průměru původního. Graf byl získán tak, že byly dány dohromady kladné i záporné odchylky. Teoreticky by totiž měly být stejné a jejich sdružení v jisté míře kompenzuje nízký počet opakování.



*Obr. 24: Maximální zjištěná odchylka vypočteného průměru od průměru původního sledovaného procesu*

Zjistili jsme tedy přibližně, jak jsou rozloženy odhady střední hodnoty, a odhady směrodatných odchylek. K porovnání metod odhadu směrodatné odchylky podle vzorců (3.1), (3.2) a (3.3) je však třeba posoudit interval vymezený pomocí vypočítané rozšířené nejistoty a odhadu střední hodnoty s pravou hodnotou měřené veličiny. Při tomto porovnání nelze dát dohromady maximální a minimální průměry s maximálními a minimálními směrodatnými odchylkami, resp. s maximálními a minimálními rozšířenými nejistotami. Je tomu tak proto, že maximální střední hodnota nekorresponduje s maximální směrodatnou odchylkou.

Pro závěrečnou analýzu je potřeba porovnávat konkrétní páry průměru a směrodatné odchylky se skutečnou hodnotou.



Obr. 25: Konfidenční hladina rozšířené nejistoty  $U_{95}$

Na Obr. 25 jsou zobrazeny dosažené konfidenční hladiny pro různé kombinace počtu měřených hodnot a směrodatných odchylek sledovaného procesu. Posuzovaná rozšířená nejistota měření byla počítána na cílovou hladinu pravděpodobnosti 95 %. Reálná konfidenční hladina se stanovila z opakovaného výpočtu střední hodnoty a intervalu určeného kolem této hodnoty rozšířenou nejistotou. Počet opakování byl řádově stovky tisíc, pro grafy zobrazené na Obr. 25 to bylo 190 000, protože vyšší hodnoty nebyly možné, kvůli nedostatečné operační paměti použitého počítače (1 GiB). Sledovalo se, kolik takto vypočítaných intervalů obsáhne skutečnou střední hodnotu. Pro  $U_{95}$  jsou přípustné pouze ty hodnoty, které nejsou menší, než požadovaných 95 %. Tento požadavek splňuje pouze nejistota měření, při které byl použit pro odhad standardní odchylky vzorec (3.1).

Neznamená to apriori, že jsou metody (3.2) a (3.3) nesprávné, znamená to pouze, že jsou nepoužitelné k výpočtu nejistoty měření dle postupů v [4]. Byly by použitelné pouze v případě, že by se upravil výpočet koeficientu krytí. Při výpočtu nejistoty měření lze tedy použít pouze vztah (3.1) a je třeba se vyvarovat možné záměny se vztahem (3.2). Vztah (3.3) se v praxi nepoužívá a byl analyzován jako další alternativní varianta, použití toho vztahu bychom se měli v každém případě vyvarovat.

Z Obr. 25 vyplývá také další zajímavý fakt, v konečném důsledku vůbec nezáleží na rozptylu sledovaného procesu, konfidenční hladina závisí pouze na počtu učiněných měření.

### 3.1.3.1 Testy rozložení pravděpodobnosti

Při výpočtu nejistoty typu A se vychází z rozložení pravděpodobnosti. Toto rozložení se vybírá na základě teoretických předpokladů, statistické analýzy souboru dat, či kombinace obojího. Kromě v předchozích kapitolách zmiňovaného normálního rozložení dat, můžeme předpokládat rozdělení například exponenciální nebo Poissonovo. Ve skutečnosti je reálné rozložení dat dáno složením mnoha dílčích rozložení, protože na měřicí přístroj, měřicí metodu i měřenou hodnotu působí řada vlivů. Některé vlivy mohou být zanedbány, jiné naopak rozložení pravděpodobnosti výrazně ovlivňují. Složením všech vlivů vznikne rozložení, které nemá podobu žádného teoretického rozdělení pravděpodobnosti, je však možné ho vhodným rozložením aproximovat. Ve většině případů je výsledné rozložení velice podobné normálnímu a proto ho lze za normální považovat. Normalitu rozložení je ale potřeba prověřovat pomocí testování. Metodika testu se bude lišit zejména podle počtu naměřených vzorků. Od metodiky a zkoumaných dat se dále odvíjí spolehlivost testu.

Testů pro rozložení pravděpodobnosti existuje celá řada, konkrétně pro ověření normality lze použít některý z následujících testů: Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, Stephens, D'Agostino, Anscombe-Glynn, D'Agostino-Pearson. Protože každý test má jinou detekční schopnost, je vhodné v praxi používat jejich kombinace [66].

Při volbě testu je potřeba zohlednit účel. V případě stanovování nejistoty typu A se nečastěji setkáváme se soubory naměřených dat v rozsahu 3 a více měření a testem chceme ověřit, zda je rozložení natolik normální, aby pro výpočet nejistoty typu A byl použitelný vztah (2.6). Dle [67] je pro tento účel nejvhodnější tzv. W-test nebo kritérium W. V softwarových aplikacích se pro ověření normality rozložení mohou používat výpočetně náročnější testy, ale W-test je pro testování vzorků určených pro výpočet nejistoty typu A dostatečný. Následující podkapitola je zaměřena na praktickou aplikaci W-testu.

### 3.1.3.2 Speciální test pro malé rozsahy výběru – kritérium W

Dle [68] je W-test vhodný pro testování shody empirického rozdělení s rozdělením normálním pro rozsah 3-50 hodnot. Tento rozsah spolu s jednoduchostí a účinností testu determinuje W-test do oblasti zpracovávání naměřených dat.

W-test stejně jako ostatní podobné testy nedokáže normalitu rozložení, ale je schopen na určité hladině významnosti hypotézu normality zamítnout. Pokud hodnota testového kritéria spadne do kritického oboru, můžeme předpokládat, že rozložení naměřených dat neodpovídá normálnímu rozložení. V opačném případě test neposkytl žádný důkaz pro vyvrácení hypotézy o normalitě rozložení naměřených dat.

Při běžných měření v průmyslové výrobě bývá nejjednodušším kritériem pro rozhodnutí o normalitě či nenormalitě dat jejich grafické zobrazení, nejčastěji formou histogramu. Problém ovšem nastává, pokud se průběh dat blíží známé Gaussově křivce, ale přesto je obava, že se nejedná o normální rozložení. V těchto situacích se často data bez dalšího zkoumání považují pro výpočet nejistoty jako normálně rozdělená, protože další zkoumání by mohlo přinést nežádoucí práci navíc a mohlo by také zpochybnit dosavadní výsledky, vypočítané na základě předpokladu normality rozložení dat. Takovéto uvažování může přinést nesprávné výsledky.

Řešením je použití např. W-testu, který vyhovuje jak pro běžné rozsahy souborů naměřených dat, tak jednoduchou metodikou výpočtu.

Kritérium W se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$W = \frac{\left[ \sum_{j=1}^l [a_{n-j+1} \cdot (x_{n-j+1} - x_j)] \right]^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n}}, \quad l = \frac{n}{2} \text{ pro sudá a } l = \frac{n-1}{2} \text{ pro lichá čísla,} \quad (3.4)$$

za předpokladu vzestupně řazeného souboru dat s prvky  $x_i$ .

Ve vztahu (3.4)  $n$  značí počet dat v testovaném souboru a  $l$  je maximální velikost sumarizačního indexu  $j$ . Koeficienty  $a_{n-j+1}$  jsou koeficienty tabelované pro  $W$ -test, které jsou stanoveny pro jednotlivé velikosti souboru  $n = 3-50$ . [68].

O zamítnutí hypotézy můžeme na pravděpodobnostní hladině  $\alpha$  rozhodnout pokud platí, že  $W < W^*$ , kde  $W^*$  je kvantil testovaného kritéria normality a platí pro něj  $\alpha = P\{W < W^*\}$ . Možné hodnoty  $W^*$  pro všechny kombinace  $n$  a nejpoužívanější hladiny pravděpodobnosti a (0,01; 0,02; 0,05; 0,10; 0,50) jsou rovněž tabelovány (viz [68]).

Výše uvedený výpočet může vypadat složitě, ale lze ho objasnit pomocí následující Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Tabulka údajů pro posouzení shody empirického a normálního rozložení pravděpodobnosti pomocí kritéria  $W$ .

	$i$	$x_i$	$x_i^2$	$j$	$a_{n-j+1}$	$x_{n-j+1} - x_j$	(5).(6)
č. sloupce	1	2	3	4	5	6	7
	1	$x_1$	$x_1^2$				
	2	$x_2$	$x_2^2$				
	.	.	.				
	.	.	.				
	.	.	.				
	$n-l+1$	$x_{n-l+1}$	$x_{n-l+1}^2$	$l$	$a_{n-l+1}$	$x_{n-l+1} - x_l$	$a_{n-l+1} \cdot (x_{n-l+1} - x_l)$
	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.
	$n-l$	$x_{n-l}$	$x_{n-l}^2$	2	$a_{n-l}$	$x_{n-l} - x_2$	$a_{n-l} \cdot (x_{n-l} - x_2)$
	$n$	$x_n$	$x_n^2$	1	$a_n$	$x_n - x_1$	$a_n \cdot (x_n - x_1)$
		$\sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n x_i^2$				$\sum_{j=1}^l [a_{n-j+1} \cdot (x_{n-j+1} - x_j)]$

V sloupci 1 je pořadový index  $i$  naměřené hodnoty, přičemž hodnoty  $x_i$  jsou ve sloupci 2 vzestupně řazené. Sloupec 3 značí druhou mocninu naměřených hodnot. Ve sloupci 4 je pomocný index  $j$ , které nabývá hodnot  $1-l$  (viz (3.4)) a je řazen vzestupně v opačném směru než index  $i$ , přičemž jeho minimální hodnota odpovídá maximální hodnotě indexu  $i$ . V sloupci 5 jsou uvedeny koeficienty  $a_{n-j+1}$  a v sloupci 6 jsou uvedeny symetrické rozdíly naměřených hodnot. Poslední sloupec 7 je tvořen součinem hodnot uvedených ve sloupci 5 a 6. Sumy sloupců 2, 3 a 7 se dosazují přímo do (3.4).



Protože ani z Tab. 3.1 nemusí být zřejmá hlavní přednost W-testu, a to jednoduchost při zachování efektivity, bude postup při provádění W-testu demonstrován na následujícím praktickém příkladě.

*Příklad:*

*Bylo měřeno napětí na výstupu analogového obvodu na deseti po sobě jdoucích vzorcích téhož výrobku. Chceme určit střední hodnotu napětí pro daný typ výrobku, spolu s nejistotou této střední hodnoty. Nejdříve je potřeba prověřit normalitu rozložení naměřených dat. Tuto hypotézu chceme ověřit na hladině významnosti  $\alpha = 0,01$ .*

*Bylo naměřeno  $n = 10$  hodnot: (13,67 V; 13,52 V; 13,50 V; 13,33 V; 13,41 V; 13,50 V; 13,60 V, 13,43 V; 13,52 V, 13,55 V). Data se vzestupně seřadí do 2. sloupce tabulky Tab. 3.2.*

Tab 3.2: Tabulka podkladů pro W-test vyšetřovaného souboru dat

$i (-)$	$x_i (V)$	$x_i^2 (V^2)$	$j (-)$	$a_{10-j+1} (-)$	$x_{10-j+1} - x_j (V)$	$(a_{10-j+1}) \cdot (x_{10-j+1} - x_j) (V)$
1	2	3	4	5	6	7
1	13,33	177,6889				
2	13,41	179,8281				
3	13,43	180,3649				
4	13,50	182,2500				
5	13,50	182,2500				
6	13,52	182,7904	5	0,0399	0,02	0,000798
7	13,52	182,7904	4	0,1224	0,02	0,002448
8	13,55	183,6025	3	0,2141	0,12	0,025692
9	13,60	184,9600	2	0,3291	0,19	0,062529
10	13,67	186,8689	1	0,5739	0,34	0,195126
$\Sigma$	135,03	1823,3941				0,286593

Vypočtení hodnot ve sloupci 3 je bezproblémové – jsou to druhé mocniny sloupce 2. Koeficienty ve sloupci 5 se odečtou ze statistických tabulek (uvedených např. v [68]). Ve sloupci 6 jsou uvedeny rozdíly  $(x_6 - x_5)$ ,  $(x_7 - x_4)$ ,  $(x_8 - x_3)$ ,  $(x_9 - x_2)$  a  $(x_{10} - x_1)$ . Do sloupce 7 se hodnoty dopočítají součinem sloupců 5 a 6. Posledním krokem je součet hodnot obsažených ve sloupci 2, 3 a 7.

Hodnota kritéria W se spočítá dosazením do vztahu (3.4):

$$W = \frac{\left[ \sum_{j=1}^l [a_{n-j+1} \cdot (x_{n-j+1} - x_j)] \right]^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n}} = \frac{\left[ \sum_{j=1}^5 [a_{10-j+1} \cdot (x_{10-j+1} - x_j)] \right]^2}{\sum_{i=1}^{10} x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^{10} x_i \right)^2}{10}} = \frac{0,286593^2}{1823,3941 - \frac{135,03^2}{10}} = 0,977688 \cong 0,978$$

Testovanou hypotézu normálního rozložení chceme otestovat na hladině významnosti  $\alpha = 0,01$ . Této hodnotě  $\alpha$  a rozsahu souboru 10 přísluší hodnota  $W^* = 0,781$ . Protože  $0,978 \geq 0,781$  ( $W \geq W^*$ ), tak není důvod k zamítnutí testované

*hypotézy, že naměřené hodnoty napětí jsou normálně rozděleny. Za těchto okolností lze použít k výpočtu nejistoty typu A vzorce (2.6).*

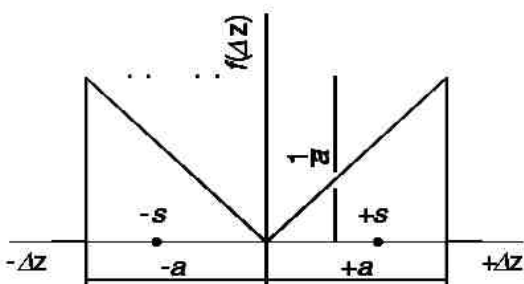
Na praktickém příkladu bylo ukázáno, že kontrola normality rozložení naměřených dat nemusí být složitou záležitostí a lze ji aplikovat do praxe jako běžnou součást výpočtu nejistoty. To, že se často naměřená data zpracovávají bez jakýchkoliv testů rozložení, ale i bez základního grafického znázornění, je nepřijatelné. Normálního rozložení nelze na základě empirických zkušeností předpokládat ani u dobře poznaných procesů, protože vždy existuje riziko, že do měření vstoupil nový vliv. V tom případě by výsledek W-testu nebyl podkladem pro jiný výpočet nejistoty, ale signálem pro vyšetření podmínek měření a případných změn v diagnostikovaném objektu. Ověření předpokládané rozložení pravděpodobnosti pomocí testu je základní předpoklad systematického a dokumentovaného vyjadřování nejistoty typu A.

### **3.1.4 Výpočet nejistoty typu B**

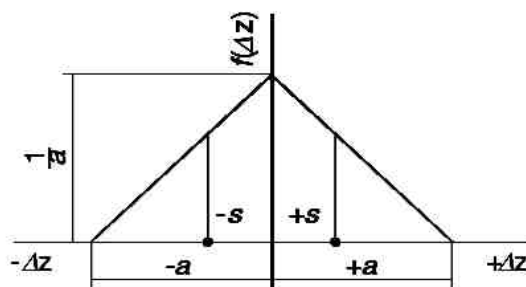
Výpočet nejistoty typu B je obecně náročnější než výpočet nejistoty typu A, protože klade zvýšené požadavky na praktické zkušenosti s používaným měřicím vybavením. U nejistoty typu A se sice setkáváme s úskalími popsány v kap. 2.1.4., ale vždy se jedná o statistickou analýzu dat, při níž řešíme výběr vzorků, rozložení pravděpodobnosti a interpretaci výsledků. U nejistoty typu B je situace o dost komplikovanější už jen s její definicí. Složky nejistoty typu B jsou totiž všechny složky nejistoty, které se určují jiným než statistickým rozborem dat. Tato definice je opravdu široká a může zahrnovat mnoho dílčích nejistot, například nejistotu vyplývající z měřicích přístrojů, metodiky, etalonů, expertních odhadů, atd. Popsat obecný způsob odhadu nejistoty měření typu B je dost obtížný úkol, protože výpočet se bude vždy lišit podle charakteru daného zdroje nejistoty.

Jako výchozí bod pro výpočet nejistoty typu B nám poslouží obecná definice nejistoty měření. Jde nám o odhad intervalu, který obsahuje hodnotu měřené veličiny s požadovanou pravděpodobností. Při výpočtu nejistoty typu B sice neanalyzujeme data pomocí statistického aparátu, ale neznamená to, že nepoužijeme pravděpodobnostní počet. Naopak, pravděpodobnostní úvahy a výpočty jsou základem pro stanovení nejistoty typu B. Jako základ nám vždy poslouží znalost či odhad intervalu, ve kterém se nalézá požadovaná hodnota. Na základě dostupných informací pak odhadujeme, s jakou pravděpodobností ve vymezeném intervalu pravá hodnota leží. Při tomto odhadu poslouží nejlépe předpoklad rozdělení pravděpodobnosti ve stanoveném intervalu a následný matematický výpočet. Výběr rozdělení pravděpodobnosti je klíčová část stanovení nejistoty, protože zejména od něj se odvíjí její velikost. Rozdělení pravděpodobnosti vybíráme na základě teoretických předpokladů a praktických zkušeností. Na následujícím Obr. 26 jsou znázorněna čtyři rozložení, která se často používají k výpočtu nejistoty typu B.

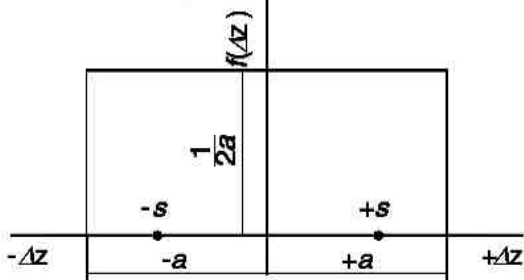
bimodální (trojúhelníkové)



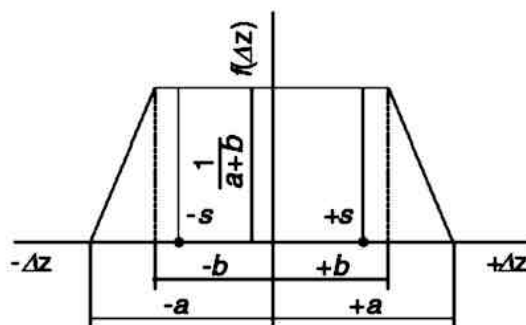
trojúhelníkové (Simpsonovo)



rovnoměrné - pravouhlé



lichoběžníkové



Obr. 26: Rozložení pravděpodobnosti, která lze použít při výpočtu nejistoty typu B (zpracováno podle [61])

V praxi se nejčastěji setkáme s použitím rozložení rovnoměrného, trojúhelníkového a lichoběžníkového, viz Obr. 26 c), b) a d), resp. Viz Obr. 4 a Obr. 5 (kap. 2.1.5). Rovnoměrné rozložení se použije, pokud předpokládáme, že hodnota měřené veličiny je uvnitř souměrného intervalu, ale nemáme informace o tom, s jakou pravděpodobností je uvnitř rozložena. V případě, že máme více informací o měřicím zařízení a předpokládáme, že indikovaná hodnota odpovídá hodnotě měřené veličiny s největší pravděpodobností, tak lze užít rozdělení trojúhelníkového. Vzhledem k realitě měření je rovnoměrné rozložení často příliš pesimistické a trojúhelníkové zase příliš optimistické. V prvním případě je problém s předpokladem, že těsně vně intervalu je pravděpodobnost výskytu hodnoty měřené veličiny prakticky nulová a těsně uvnitř roste na vysokou hodnotu. Takovýto stav se reálně vyskytuje pouze u číslicové techniky. U trojúhelníkového rozložení je zase na místě pochybnost o tom, zda pravděpodobnost výskytu zjišťované hodnoty je opravdu nejvyšší v naměřené hodnotě, protože zkušenost napovídá, že se může se stejnou pravděpodobností vyskytovat i v blízkém okolí naměřené hodnoty. Nedostatky těchto rozložení řeší použití lichoběžníkového rozložení. Odhad jeho parametrů není na základě větší historie dat a zkušeností s konkrétním měřicím problémem nikterak obtížný. Bohužel v reálné praxi se používání lichoběžníkového rozložení zatím široce neprosadilo. Používá se většinou rovnoměrné rozložení, které při minimálním úsilí při výpočtu dává spolehlivý odhad nejistoty. Tento přístup ale není nijak ideální, protože při něm často dochází k neadekvátnímu nadhodnocování nejistoty, což není žádoucí a devalvují se tím snahy o co nejvyšší přesnost měření.

V měřicích laboratořích, které upřednostňují statistický přístup se často pro výpočet nejistoty typu B používá normální rozložení, viz Obr. 6. U něj je třeba upozornit na jeden zásadní problém. Je jím vyčíslení konfidenční úrovně. Musíme vzít v úvahu, že parametry použitého normálního rozložení jsou jen odhady a míru jejich

spolehlivosti je potřeba zahrnout při výpočtu rozšířené nejistoty, viz kap. 3.1.6.1. Při tom je třeba si uvědomit, že celá skupina nejistot typu B *není* založena na statistickém přístupu. Kdyby se daný zdroj nejistoty dal kvantifikovat statistickou metodou, tak by se jednalo o nejistotu typu A. U nejistot typu B se používá pravděpodobnostní přístup a odhad parametrů normálního rozložení se realizuje jinak než statisticky. V tom případě je poměrně těžké určit míru spolehlivosti tohoto odhadu, tedy velikost stupňů volnosti. I když výpočet pomocí normálního rozložení vypadá sofistikovaně, tak může v konečném důsledku způsobit nežádoucí podhodnocení výsledné rozšířené nejistoty. Právě z tohoto důvodu se jeví výhodnější použití lichoběžníkového rozložení namísto rozložení normálního.

Při výběru rozložení pravděpodobnosti, kterého použijeme při výpočtu nejistoty typu B, se ale nesmíme automaticky přiklánět k zmíněným variantám. Různé oblasti a techniky měření mají svá specifika a v některých případech nevyhovuje rozložení rovnoměrné, trojúhelníkové, lichoběžníkové ani normální. Může například nastat případ, ve kterém známe pravděpodobnou odchylku měřené hodnoty od hodnoty naměřené, jen nevíme, jestli je kladná či záporná. V takové situaci vlastně víme, že naměřená hodnota je určitě jiná než naměřená. V takovém případě můžeme použít např. bimodální trojúhelníkové rozdělení pravděpodobnosti znázorněného na Obr. 26 a). Dalším případem ve kterém nemůžeme použít pro výpočet nejistoty typu B vzorec (2.10) s předpokladem lichoběžníkového rozložení (kterého jsou rozložení rovnoměrné a trojúhelníkové speciálními případy), je v případě nesymetrických mezí. V literatuře se výpočet v případě nesymetrických mezí často opomíjí jako speciální. Nicméně se nejedná o žádný speciální případ, ale o případ velice častý. Pokud dochází k měření na pomezí rozsahů, při kterém se rozsahy mění, tak je část hodnot naměřena s jinou přesností než ostatní. Rovněž je třeba vzít v úvahu relativní přesnost měření ve stejném rozsahu, která se u některých měření může pro naměřené hodnoty podstatně lišit. Často se jako odhad měřené veličiny používá prostá střední hodnota naměřených dat. Před zahájením výpočtu nejistoty typu B je vždy třeba vzít v úvahu případnou nesymetričnost rozložení pravděpodobnosti výskytu měřené hodnoty okolo této střední hodnoty. Pokud by takováto nesymetrie existovala, tak by standardní postup, kdy se vezme aritmetický průměr naměřených dat a dosadí se do vzorce pro výpočet nejistoty při rovnoměrném (resp. trojúhelníkové či lichoběžníkové) rozložení pravděpodobnosti, dával špatné výsledky. Nejenom, že by došlo k chybnému odhadu nejistoty, ale také vlastně k chybnému odhadu měřené veličiny. Z tohoto vyplývá, že před zahájením výpočtu nejistoty typu B je třeba provést správný odhad měřené hodnoty a podrobně rozumět způsobu provedení tohoto odhadu.

Protože při většině měření drtivě převažuje nejistota typu B nad nejistotou typu A, tak právě způsob odhadu nejistoty typu B určuje velikosti výsledné rozšířené nejistoty. Proto je potřeba věnovat mu patřičnou pozornost. V technických protokolech je často vidět zaměření na náhodnou složku nejistoty a jejímu statistickému rozboru, kdežto u systematické složky se prostě převezmou údaje o chybě, kterou udává výrobce měřicí techniky a bez jakéhokoliv dalšího rozboru se použije jednoduchý vztah (2.9) pro rovnoměrné rozložení. Přitom výběr rozložení má přímý a významný vliv na výslednou nejistotu. Například standardní nejistota spočítaná dle vzorce (2.9) pro rovnoměrné rozložení a je  $\sqrt{2}$ , tedy o cca 1,41 násobek větší nežli standardní nejistota spočítaná dle vzorce (2.11) pro trojúhelníkové rozložení. Pokud je role nejistoty typu B v dané měřicí úloze převažující, tak ve výsledku to může znamenat rozdíl ve výsledné nejistotě až 40 %!

Výrobci měřicí techniky uvádějí často pouze interval, ve kterém by měla ležet hodnota měřené veličiny. Údaj o rozložení pravděpodobnosti výskytu měření hodnoty v tomto intervalu zpravidla chybí. Na základě takto omezených informací by se mělo volit rovnoměrné rozložení pro celý interval. Na druhé straně bude ve většině případů vyšší pravděpodobnost výskytu hodnoty měřené veličiny uprostřed intervalu a pak by při použití rovnoměrného rozložení docházelo ke zbytečnému nadsazování, které bylo zmíněno v předchozím odstavci. V technické praxi se používá neexaktní postup, při kterém je trojúhelníkové rozložení použito pro měřicí přístroje, s nimiž je dostatek zkušeností a kterým důvěřujeme.

Tento přístup se může na první pohled zdát jako nespolehlivý, ale přesto přináší dobré výsledky. V podstatě jde o odhad rozložení pravděpodobnosti na základě historie naměřených dat.

Když se na tuto zjednodušující úvahu podíváme zblízka, zjistíme, že jde vlastně o porovnávání hodnot naměřených přístrojem s reálnými hodnotami. V podstatě se jedná o formu kalibrace. Kalibrační měření tedy může sloužit jako podklad pro výpočet nejistoty. Tento fakt je zřejmý už z toho, že výstupem kalibrace je přímo vyjádření nejistoty měření. Ta pak může být použita při vyjadřování nejistoty dalších měření. Pokud máme vyjádřenou nejistotu přímo od výrobce nebo z kalibrace, máme dostatek údajů a rozložení pravděpodobnosti není třeba dále řešit. Jakmile výrobce udává jen chybu měření, je potřeba rozložení pravděpodobnosti odhadnout. To znamená měření hodnot etalonů o známých nominálních hodnotách nebo porovnávání měření s přesnějším přístrojem.

Vodítkem při odhadu rozložení pravděpodobnosti může být také teoretická analýza použité měřicí metody. Pokud zanalyzujeme jednotlivé součásti měřicího zařízení a jejich vlivy na výsledek měření, tak v souhrnu dostaneme poměrně přesnou představu o tom, jak bude rozložena výsledná chyba měření. Čím více vlivů do měření vstupuje, tím obtížnější je rozložení odhadnout. Při praktických měřeních se tento velký počet neznámých vlivů v konečném důsledku sdružuje a zjednodušuje. Aproximace spočívá v použití výše již zmíněného normálního nebo trojúhelníkového rozložení.

Může se zdát, že z hlediska uživatele měřicí techniky se problematika vyjadřování rozložení pravděpodobnosti použitého pro výpočet nejistoty typu B omezuje pouze na obstarání informací od výrobce měřicího zařízení. Tento přístup má ale jedno úskalí. Ne vždy se shoduje papírová přesnost měřicího přístroje a rozložení jeho chyby s reálným měřením. Toto nemusí být způsobeno špatným přístrojem, ani nepodloženými údaji výrobce. Problematickým faktorem jsou podmínky měření. Měřicí přístroj má dané měřicí charakteristiky z výroby a ty jsou ověřovány kalibračním měřením, které probíhá mnohdy za specifických podmínek v kalibrační laboratoři. V praxi se můžeme setkat s tím, že dva velice přesné přístroje měřící totéž, ukazují odlišnou hodnotu a přitom je přesnost obou přístrojů ověřena kalibrací. Tento problém sice spadá do vyjadřování nejistoty typu B, ale jeho řešení není ve volbě rozložení pravděpodobnosti. Je třeba se vrátit zpět k určování zdrojů nejistoty (kap. 3.1.2). Chyba způsobená vnějšími podmínkami musí být eliminována, nebo kvantifikována jako zvláštní člen.

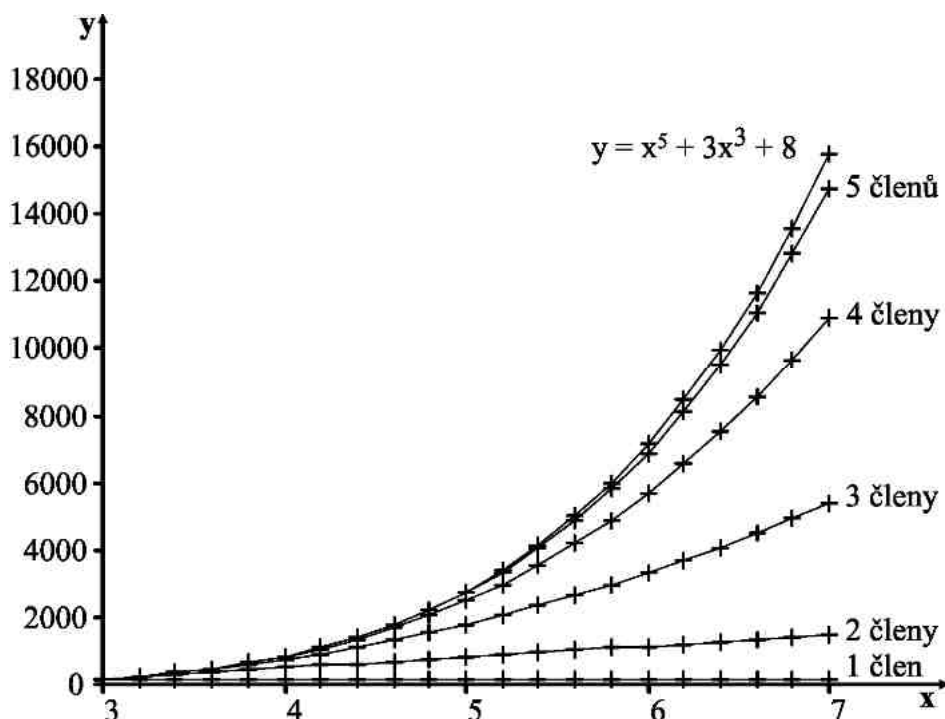
### **3.1.5 Kombinovaná nejistota**

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.1.6, kombinovaná nejistota je sdružení všech dílčích nejistot. To jak se jednotlivé dílčí nejistoty na kombinované nejistotě podílí, je dáno dvěma faktory: funkčním vztahem výstupní veličiny, tedy jednotlivými

parciálními derivacemi, a vzájemnou závislostí jednotlivých nejistot, vyjádřenou pomocí korelačního koeficientu.

Výpočet kombinované nejistoty podle vztahu (2.12) nepředstavuje žádný větší výpočetní problém. Tento výpočet ale vychází z linearizačního přístupu. Vztah (2.12) doporučený ve všech základních publikacích, zejména v [4], je založen na Taylorově rozvoji prvního řádu. Ve většině dostupné literatury je tento fakt konstatován bez bližšího komentáře (např. [3] nebo [55]). V [25] je doporučeno v případě významné nelinearity výstupní veličiny použít Taylorova rozvoje vyššího řádu.

Z podstaty aproximace Taylorovou řadou nízkého řádu je zřejmé, že bude dobře aproximovat lineární závislosti, ale silně nelineární vztahy nebudou postihnuty již tak dobře. Na následujícím Obr. 27 je znázorněno, jak se počet členů Taylorova rozvoje projeví v případě aproximace ilustrativně vybrané nelineární funkce  $y = x^5 - 3x^3 + 8$ .



Obr. 27: Aproximace funkce  $y = x^5 - 3x^3 + 8$  Taylorovou mocninou řadou

Z toho je vidět, že aproximace prvního řádu neodpovídá v případě nelineární závislosti skutečnosti. Jak je to ale v případě nejistoty měření? Bude rozdíl mezi základním vztahem (2.12) a rozšířením o další člen?

Na předchozím příkladě si můžeme demonstrovat, jak se bude lišit rozšířená nejistota měření vypočtená s druhým členem Taylorova rozvoje a s jeho zanedbáním. Pro výpočet použijeme parametry, které by se mohly vyskytovat v praxi: přesnost přístroje 1,5%, náhodou chybu minimální na úrovni maximální odchylky 0,1 při 10 měření. Koeficient krytí  $k = 3$  pro úroveň pravděpodobnosti 99%. Pro druhý člen Taylorova rozvoje kombinovaného rozptylu nejistoty použijeme vzorec (3.5) uvedený v [5]:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right) + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (3.5)$$

Po dosazení přejde tento člen v následující tvar:

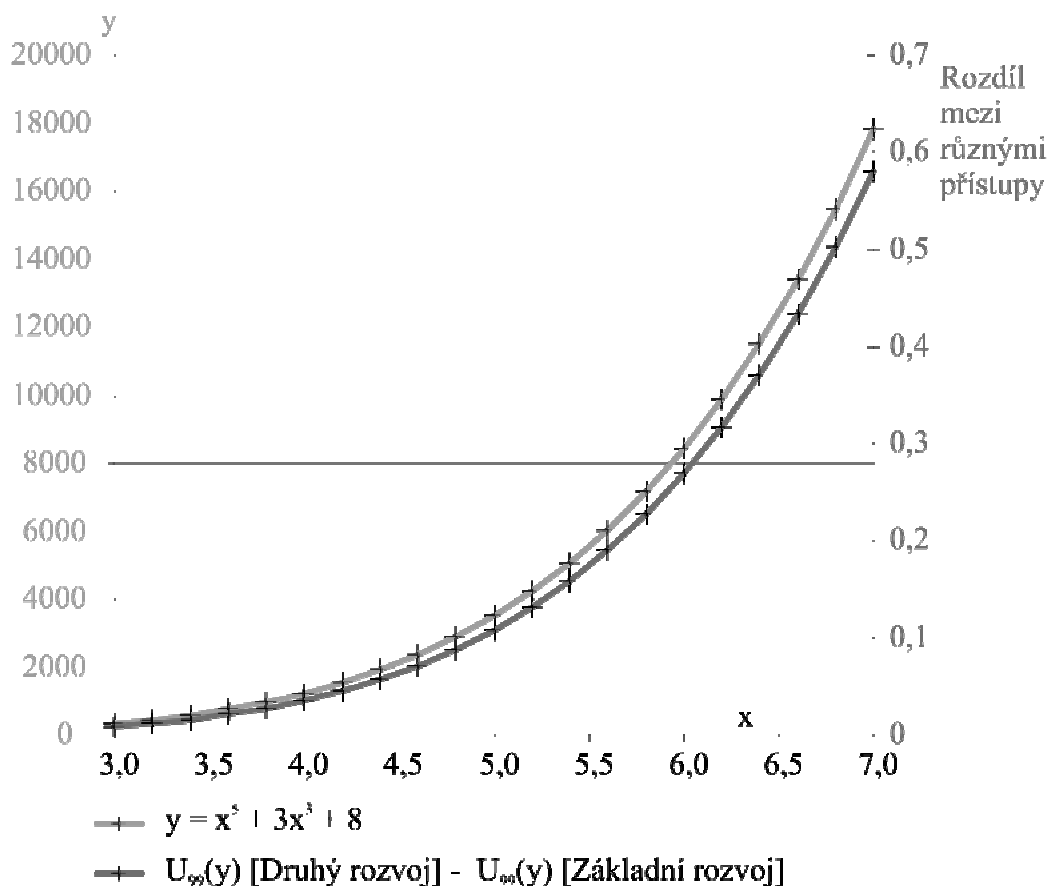
$$\left(\frac{1}{2}(20x^3 + 18x)^2 + (5x^4 + 9x^2)(60x^2 + 18)\right)u_A^4(x) + \left(\frac{1}{2}(20x^3 + 18x)^2 + (5x^4 + 9x^2)(60x^2 + 18)\right)u_B^4(x) \quad (3.6)$$

Po výpočtu nejistoty A, nejistoty B, kombinované nejistoty a rozšířené nejistoty dostaneme následující výsledky:

*Tab 3.3: Hodnota rozšířené nejistoty na konfidenční hladině 95%<sub>a</sub> kdy kombinovaná nejistota byla vypočtena za použití běžného vztahu (2.12) a za použití rozšiřujícího členu (3.5)*

<b>x</b>	<b>y</b>	<b>U<sub>99</sub>(y) Taylor prvního řádu</b>	<b>U<sub>99</sub>(y) Taylor druhého řádu</b>	<b>absolutní rozdíl</b>	<b>rozdíl (v % výsledné veličiny)</b>
3,0	332,00	26,79	26,80	0,0086	0,0026
3,2	441,85	36,24	36,26	0,0118	0,0027
3,4	580,27	48,24	48,25	0,0159	0,0027
3,6	752,63	63,26	63,28	0,0211	0,0028
3,8	964,97	81,86	81,89	0,0277	0,0029
4,0	1224,00	104,65	104,68	0,0357	0,0029
4,2	1537,18	132,31	132,35	0,0455	0,0030
4,4	1912,71	165,58	165,64	0,0574	0,0030
4,6	2359,64	205,29	205,36	0,0716	0,0030
4,8	2887,82	252,35	252,44	0,0885	0,0031
5,0	3508,00	307,73	307,84	0,1084	0,0031
5,2	4231,86	372,50	372,63	0,1319	0,0031
5,4	5072,04	447,82	447,98	0,1592	0,0031
5,6	6042,17	534,93	535,12	0,1908	0,0032
5,8	7156,90	635,18	635,41	0,2273	0,0032
6,0	8432,00	750,01	750,28	0,2692	0,0032
6,2	9884,31	880,95	881,27	0,3170	0,0032
6,4	11531,85	1029,66	1030,04	0,3715	0,0032
6,6	13393,81	1197,90	1198,34	0,4331	0,0032
6,8	15490,63	1387,54	1388,05	0,5027	0,0032
7,0	17844,00	1600,57	1601,15	0,5810	0,0033

V Tab. 3.3 je vidět, že i silné nelineární závislosti výstupní veličiny je vliv druhého členu Taylorova rozvoje při výpočtu kombinované nejistoty zanedbatelný. Rozdíl činí setiny procenta výsledné veličiny. Viz následující Obr. 28.



Obr. 28: Výstupní veličina  $y$  a absolutní rozdíl mezi aproximacemi při výpočtu nejistoty.

Z Obr. 28 je vidět, že absolutní rozdíl rozšířené nejistoty je vzhledem k velikosti výstupní veličiny zanedbatelný. Z tohoto vyplývá, že pro kombinovanou nejistotu vztahu  $y = x^5 - 3x^3 + 8$  není nutné používat komplikovaný člen (3.5). Plně nám postačí základní vztah (2.12).

Z uvedeného případu vyplývá, že se nelineárního vztahu výstupní veličiny nemusíme příliš obávat a ve většině případů nemusíme výpočet nejistoty komplikovat. I při vyšších hladinách konfidence se zanedbání druhého členu Taylorova rozvoje nijak neprojeví.

Tento závěr nelze paušalizovat bez další praktických a teoretických odvození, ale je v souladu i se zjištěním ostatních autorů. Např. v [69] autor zvolil jiný přístup k analýze problému a zjistil, že i pro nelineární vztah použití stačí použití prvního členu Taylorova rozvoje. Druhý člen Taylorova rozvoje se této případové studii plně vyrovnal metodě Monte Carlo. Pro komplikovanější silně nelineární vztahy ovšem autor doporučuje použít vyšší členy Taylorova rozvoje a případně výsledek porovnat s další metodou, např. právě s metodou Monte Carlo.

### 3.1.5.1 Nejistota v případě nelineární korelace vstupních veličin

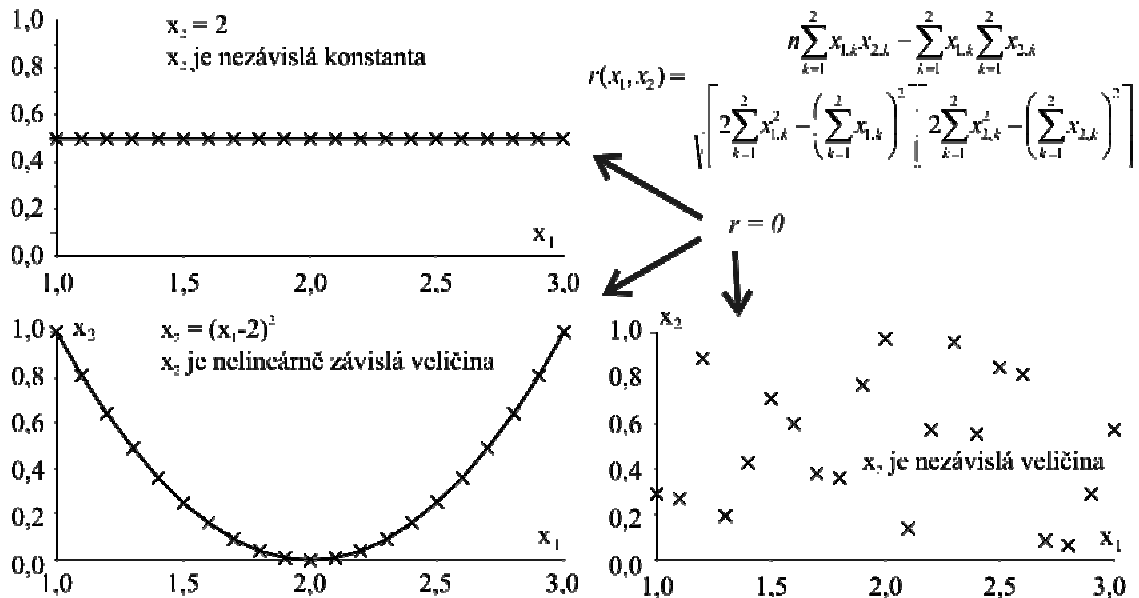
Nejenom výstupní veličina je závislá na vstupních veličinách. Tyto mohou být závislé také mezi sebou. Jak již bylo uvedeno v kap. 2.1.6.2, tato závislost ve výpočtu kombinované nejistoty zahrnuje pomocí korelačního koeficientu a vztahu (2.21).

Proč se korelace do nejistoty promítá, je celkem zřejmé. Představme si dvě vstupní veličiny. Učiníme odhad první veličiny s tím, že ji nedokážeme přímo určit. Pak odhadujeme druhou veličinu, se kterou je situace obdobná, ale ještě navíc musíme



přihlédnout k faktu, že tato veličina je závislá na veličině první. Protože míru závislosti odhadujeme a první veličinu neznáme, tak logicky musíme výslednou nejistotu měření navýšit.

Problém ale může nastat s tím, že korelační koeficient použitý ve vztahu (2.21) je lineární. V podstatě se naměřená data proloží přímkou a sleduje se její sklon. Tento fakt je dobře vidět na následujícím Obr. 29.



Obr. 29: Tři různé případy závislosti dvou vstupních veličin, při kterých je  $r = 0$

Na Obr. 29 jsou vidět tři různé případy závislosti veličin  $x_1$  a  $x_2$ . V prvním případě znázorněném vlevo nahoře je veličina  $x_2$  konstantní a tudíž nezávislá na veličině  $x_1$ . V případě znázorněném v grafu vpravo dole vidíme náhodné rozmístění hodnot veličiny  $x_2$ . I v tomto případě je veličina  $x_2$  nezávislá na veličině  $x_1$ . Zajímavá situace nastává u případu znázorněného vlevo dole. Veličina  $x_2$  je jasně parabolicky závislá na veličině  $x_1$ . Přitom korelační koeficient vychází nulový. Je tomu tak proto, že data jsou souměrná a proložená přímkou bude vodorovná stejně jako v případě prvního grafu. Velice pěkně jde tento fakt vysvětlit na jakémkoliv souměrném obrázku. Lineární korelační koeficient vyjde vždy nulový a tento fakt svádí k prohlášení nezávislosti veličin. Pouhým okem však vidíme naprosto jasně danou nelineární závislost.

Z výše uvedeného faktu vyplývá, že musíme striktně rozlišovat mezi výrazy „veličiny jsou lineárně nezávislé“ a „veličiny jsou nezávislé“.

Obecně řešení vlivu silně nelineárně korelovaných vstupních veličin spočívá v matematické analýze závislosti. Pro vyhodnocení může postačit jednoduché grafické znázornění, ale ve složitějších případech se dostaneme k matematickým modelům. Autoři obecně doporučují použití metody Monte Carlo (např. [73]).

Zajímavé je, že aktuální obsáhlá studie JCGM [74], která se zabývá využitím metody Monte Carlo pro výpočet nejistoty měření, tuto metodu pro vyřešení otázky nelineární i lineární korelace vstupních veličin nepoužívá. V práci je přímo zmíněno, že v praxi bývá problém i s výpočtem lineárního korelačního koeficientu a proto je lepší použít inženýrský přístup. Dle [74] je nejlepší vzít si vztah (2.21) a zkusmo si do něj

dosadit hodnoty  $r = 0$  a  $r = 0,9$ . Pokud bude rozdíl zanedbatelný, nemá cenu situaci dále analyzovat.

S tímto soudem lze ve většině případů souhlasit. Pokud ani přímá lineární závislost neovlivní nejistotu měření, tak můžeme usoudit, že ve výpočtu by nehrála velkou roli ani závislost nelineární. Může to znít paradoxně, ale v mnoha případech, kdy jsou vstupní veličiny závislé například exponenciálně se pohybujeme v takové části funkce, kde aproximace přímkou nezkreslí situaci natolik, abychom nemohli učinit rozhodnutí, zda závislost má nebo nemá na nejistotu vliv.

Odlíšná situace je v případě, kdy jsou vstupní veličiny navzájem závislé podle periodické funkce. V tomto případě se matematickému rozboru například pomocí Fourierovy řady nevyhneme.

### 3.1.6 Rozšířená nejistota

Jestliže byly u každého z předchozích kroků výpočtu nejistoty identifikovány větší či menší problémy, tak nejinak je tomu i při kroku finálním, tedy při výpočtu rozšířené nejistoty. V kapitole 2.1.7 bylo popsáno, že výpočet rozšířené nejistoty spočívá v rozšíření intervalu kombinované nejistoty tak, aby výsledná nejistota byla na požadované úrovni konfidence.

Zásadní problémem je stanovení správné míry tohoto rozšíření, tedy koeficientu krytí  $k$ . Při jeho určování je potřeba nejdříve stanovit stupně volnosti pro každou vstupní nejistotu a z nich pak stanovit efektivní stupně volnosti dle vztahu (2.28). To je někdy v praxi obtížné a proto se používá zjednodušeného koeficientu krytí  $k = 2$  pro 95% a  $k = 3$  pro 99% úroveň konfidence. Problematiku použitelnosti této aproximace bude rozebrána v kapitole 3.1.6.2, ale nejdříve je třeba analyzovat stanovování stupňů volnosti nejistoty typu B. Tomu se věnuje následující kapitola.

#### 3.1.6.1 Výpočet stupňů volnosti nejistoty typu B

Pro nejistoty typu A jsou stupně volnosti rovny  $v_i = n(u_i) - 1$ , kde  $n(u_i)$  je počet dat, která byla použita pro výpočet nejistoty  $u_i$ . U nejistoty typu B je situace více komplikovaná. Platí, že stupně volnosti každé složky nejistoty souvisí počtem a relevancí informací, na základě kterých byl učiněn odhad nejistoty. Jak roste množství těchto informací, tak rostou i stupně volnosti. V případě nejistoty typu B, kterou může například být například expertní odhad, se ale těžko posuzuje, zda jsou data relevantní a dostatečná, tudíž je obtížné vyčíslit i stupně volnosti.

Pro výslednou nejistotu odkazují konečné efektivní stupně volnosti vždy na situaci, kdy alespoň jedna podílejší se nejistota není přesně známa. V praxi rozšířeným zjednodušením je používání nekonečných stupňů volnosti pro nejistotu typu B (viz [30]). Tato úvaha stojí na předpokladu, že nejistota typu A je založena na statistice – tudíž je to nejistý odhad, a nejistota typu B není založena na statistice – tudíž je jistá. To může být velice zavádějící a nepravdivá úvaha. Nejčastější nejistotou typu B je nejistota spojená s přesností měřicího vybavení. Někdy výrobce udává nejistotu přímo, někdy je třeba ji vypočítat z údajů o přesnosti. Pokud nejistotu počítáme, můžeme dospět k různým výsledkům v závislosti na použitém rozložení pravděpodobnosti. Postup výpočtu záleží na povaze měřicího přístroje a na zkušenostech s ním. Pakliže se v laboratoři stanoví jeden způsob výpočtu, tak pokaždé dostaneme pro stejnou hodnotu naměřené veličiny tu samou nejistotu. To by opravdu ukazovalo na nekonečné stupně volnosti. Jinak postavená otázka – jsme si skutečně jistí, že jsou údaje výrobce správné a že jsme zvolili správné rozdělení? – ukazuje spíše na konečné stupně volnosti. Někdy

jsme si paradoxně dokonce jistější nejistotou typu A, kterou jsme určili větším počtem měření a máme tak odhad o rozložení pravděpodobnosti, který se velice blíží skutečnosti. Kdežto nejistotou typu B si být tak jistí nemusíme, i když nám vychází stále stejné číslo.

Jsou v podstatě dvě možnosti jak situaci řešit:

- Nepoužívat nekonečné stupně volnosti, pokud je to alespoň trochu možné, a nějakou cestou se pokusit o výpočet stupňů volnosti. Jako vhodná se jeví metoda doktora Castrupa, jejíž popis byl uveřejněn v [53] a [54]. Jinou možností je použití přístupu doktora Halla [56], při kterém pro odhad nejistoty měření využívá metodu Monte Carlo.
- Když nekonečné stupně volnosti použijeme, tak musíme zajistit věrohodnost nejistot typu B. Toho můžeme dosáhnout pomocí kalibrace, znalostí rozdělní možné chyby a někdy nadhodnocením nejistoty.

### 3.1.6.2 Stanovení koeficientu krytí

V kapitole 2.1.7 bylo nastíněno, že se při stanovování koeficientu krytí používá určitý stupeň aproximace. Někdy se dokonce problematika výpočtu koeficientu krytí zjednodušuje pouze na použití pevně stanovených hodnot. Konkrétně na  $k = 2$  pro 95% a  $k = 3$  pro 99% úroveň konfidence. Určitá míra aproximace je vždy při praktickém vyjadřování nejistoty nutná. Na druhou stranu může mít nevhodně zvolené zjednodušení za následek nesprávné stanovení nejistoty. V následující analýze se pokusíme posoudit, jak velké chyby se při použití různých zjednodušení dopouštíme a zda je lze vůbec používat. A pokud ano, tak za jakých podmínek.

Existuje celá řada návodů na vyjadřování nejistoty měření, například v této práci často zmiňovaný [20], ale tyto návody se bohužel většinou nepouští do hlubší analýzy výpočtu rozšířené nejistoty. Některé zdroje (např. [60]) popisují rozšířenou nejistotu pouze jako kombinovanou nejistotu vynásobenou koeficientem krytí, bez toho aby rozebíraly nějaké další detaily. Koeficient krytí se často doporučuje, jak bylo zmíněno výše,  $k = 2$  pro  $p = 95 \%$  a  $k = 3$  pro  $p = 99,7 \%$  (nebo 99 %, viz [62]). Publikace které rozebírají výpočet nejistoty měření do větších podrobností, jako např. [3], popisují výpočet koeficientu krytí za pomoci Studentova rozdělení a efektivních stupňů volnosti, dle vztahu (2.27), a v souladu s doporučením v [4] doporučují pro výpočet efektivních stupňů volnosti použít zjednodušený Welch-Satterthwaitův vztah (2.28), popřípadě jeho složitější variantu (3.7) pro nepřímá měření

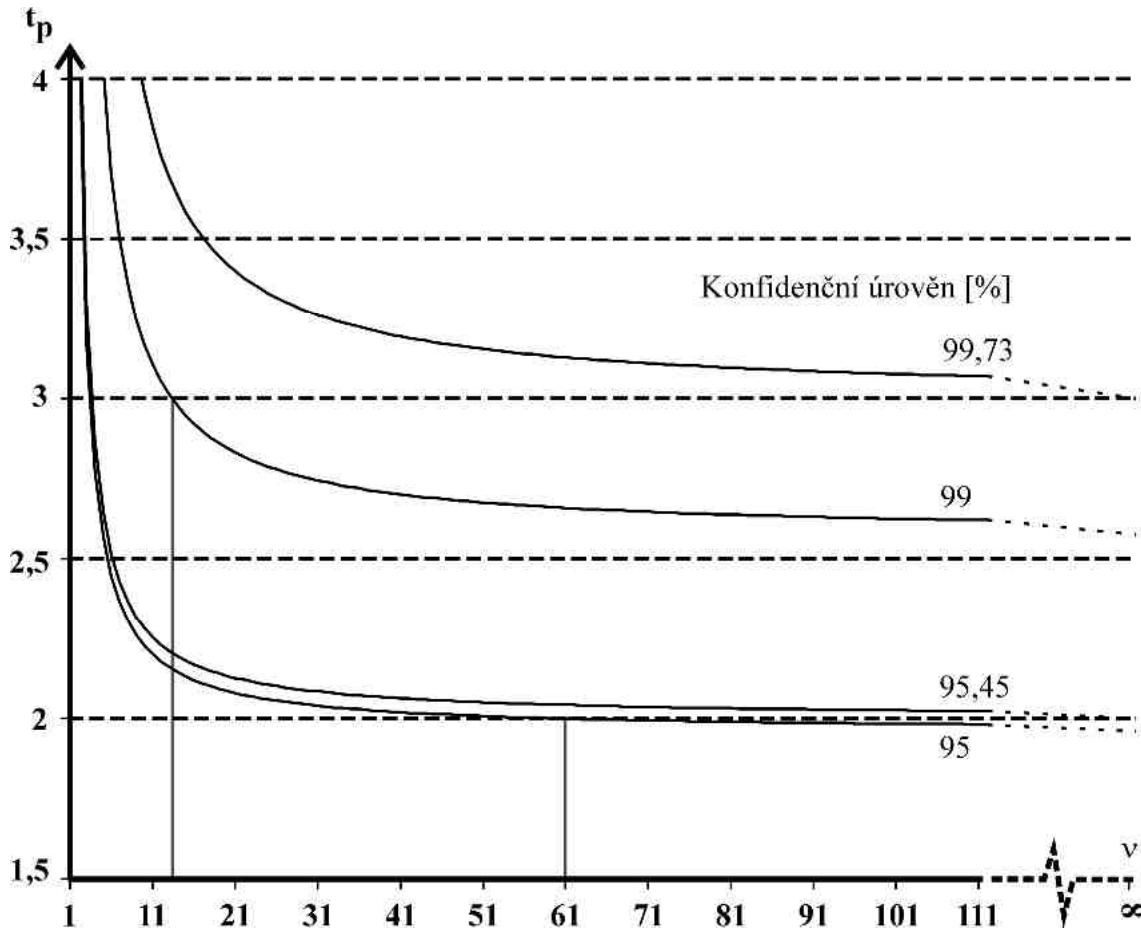
$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^4 u_i^4}{v_i}}, \quad (3.7)$$

kde  $u_i$  jsou všechny dílčí nejistoty, které se podílí na kombinované nejistotě  $u_c$  a  $v_i$  jsou stupně volnosti těchto složek. Parciální derivace výstupní veličiny podle vstupních veličin  $x_i$ , která ve vztahu figuruje, reflektuje vliv vstupních veličin na výstupní podle definičního vztahu (2.1),

Pokud se kombinovaná nejistota skládá z více než jedné složky, což je v praxi většina případů, zdá se být použití W-S vztahu (ať již ve variantě (3.7) či (2.28))

nutností. Bez tohoto výpočtu se totiž při vlivu více zdrojů nejistoty výsledné efektivní stupně volnosti těžko odhadují.

Pokud máme vyjádřené efektivní stupně volnosti, můžeme podle vzorce (2.27) určit z tabulky Studentova rozdělení příslušný koeficient krytí. Na Obr. 30. je znázorněna závislost koeficientu krytí, tedy koeficientu Studentova rozdělení  $t_p$ , na stupních volnosti a úrovni pravděpodobnosti.



Obr. 30: Koeficient Studentova rozložení v závislosti na stupních volnosti a úrovni pravděpodobnosti (pro názornost znázorněn spojité)

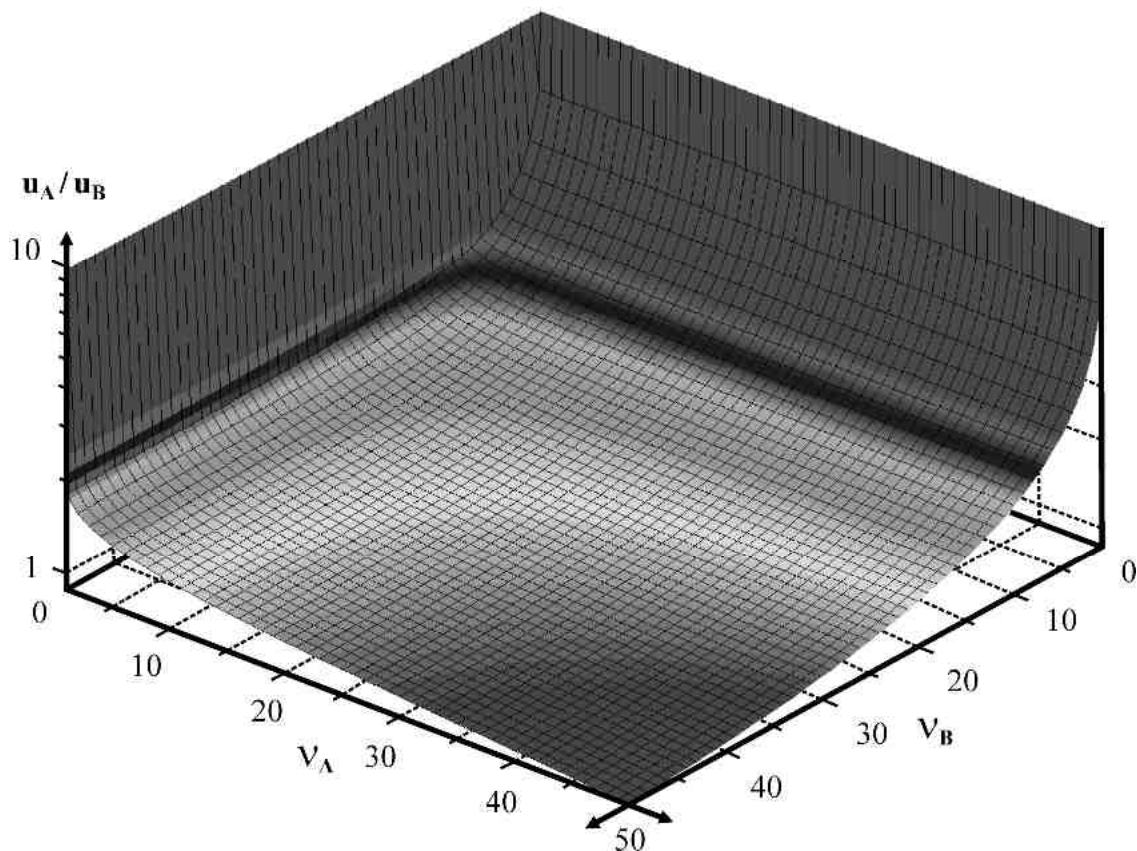
Nejčastěji používané úrovně konfidence jsou 95 % a 99 % nebo takzvané úrovně 2 a 3 sigma, které odpovídají úrovním 95,45 %, resp. 99,73. Tyto úrovně se bohužel zaměňují a 95% úrovní konfidence se často myslí 95,45 %. Někdy to není omyl, ale pouze aproximace. Běžně užívané koeficienty krytí  $k = 2$  a  $k = 3$  jsou ve skutečnosti koeficienty Studentova rozdělení pro nekonečné stupně volnosti. Kvůli této aproximaci se může zvětšovat interval, který přísluší rozšířené nejistotě a roste tedy šance, že hodnota měřené veličiny bude ležet v tomto intervalu s požadovanou pravděpodobností 95 nebo 99 %. Na druhou stranu je nepřijatelné, aby kvůli této aproximaci došlo k podcenění nejistoty měření. Z toho vyplývá, že koeficient krytí  $k = 2$  je možno použít až poté, co koeficient Studentova rozdělení klesne právě pod tuto hranici. Pro koeficient krytí  $k = 3$  je situace lepší, protože tam není žádný problém 99% hladiny pravděpodobnosti dosáhnout. Situaci přehledně shrnuje následující tabulka Tab. 3.4, ve které jsou vyznačeny zmiňované hladiny pravděpodobnosti a klíčové stupně volnosti, kdy dle Obr. 30. dochází k protnutí s používanými koeficienty krytí.

Tab 3.4: Koeficient krytí v závislosti na stupních volnosti a úrovni konfidence

$\nu \setminus p$	95 %	95,45 %	99 %	99,73 %
9	2,26	2,32	3,25	4,09
14	2,14	2,20	<b>2,98</b>	3,64
61	<b>2,00</b>	2,04	2,66	3,13
$\infty$	1,96	<b>2,00</b>	2,58	<b>3,00</b>

Z tohoto je jasné, že ve složitějších případech, kdy si nejsme jisti, jaké budou ve skutečnosti výsledné stupně volnosti, nelze zjednodušující koeficient krytí  $k = 2$  pro 95% úroveň pravděpodobnosti automaticky použít, protože hrozí podcenění výsledné nejistoty měření. Že nejde toto zjednodušení použít automaticky neznamená, že nejde použít vůbec. Zkušený a kvalifikovaný personál dokáže celkem bezpečně odhadnout, jestli výsledné efektivní stupně volnosti budou menší než-li 100, či mnohem větší. V případech kdy efektivní stupně volnosti budou odhadnuty jako mnohem větší než 100, tak lze aproximaci  $k = 2$  použít. Pokud ne, tak je nutno provést detailnější analýzu. V následujícím textu je rozebrán v praxi častý případ přímého měření, kdy máme jenom dvě vstupní složky nejistoty, a to jednu složku typu A stanovenou z opakovaných měření, a jednu složku typu B stanovenou z přesnosti měřicího přístroje.

Zaměříme se na problematickou hladinu 95 %. Základní otázka je, jak velký může být poměr  $u_B/u_A$ , a jak velké mohou být stupně volnosti  $\nu_A$  a  $\nu_B$  příslušející jednotlivým složkám nejistoty. Odpověď je ve S-W vztahu (2.28). Z Tab. 3.4 je vidět, že křivka pro 95% pravděpodobnost protne dvojku při 61 efektivních stupních volnosti. Potřebujeme tedy najít takový poměr  $u_B/u_A$ , a takové stupně volnosti  $\nu_A$  a  $\nu_B$ , které zajistí, že počet efektivních stupňů bude roven nebo větší 61. Grafické řešení tohoto problému je na Obr. 31 a Obr. 32.



Obr. 31: Minimální poměr  $u_B/u_A$  a  $v_A$  pro dosažení 61 efektivních stupňů volnosti při různých  $v_B$

Výpočet byl realizován tak, že byl hledán hraniční poměr  $u_B/u_A$ , pro každé  $v_A$  tak, aby výsledné stupně volnosti byly rovny 61, s tím že  $v_B$  byly použity jako parametr. Pro výpočet je poměr  $u_B/u_A$  substituován jako  $r_{BA}$ .

$$r_{BA} = \frac{u_B}{u_A} \quad (3.8)$$

V případě nekonečných stupňů volnosti přejde vztah (2.28) na

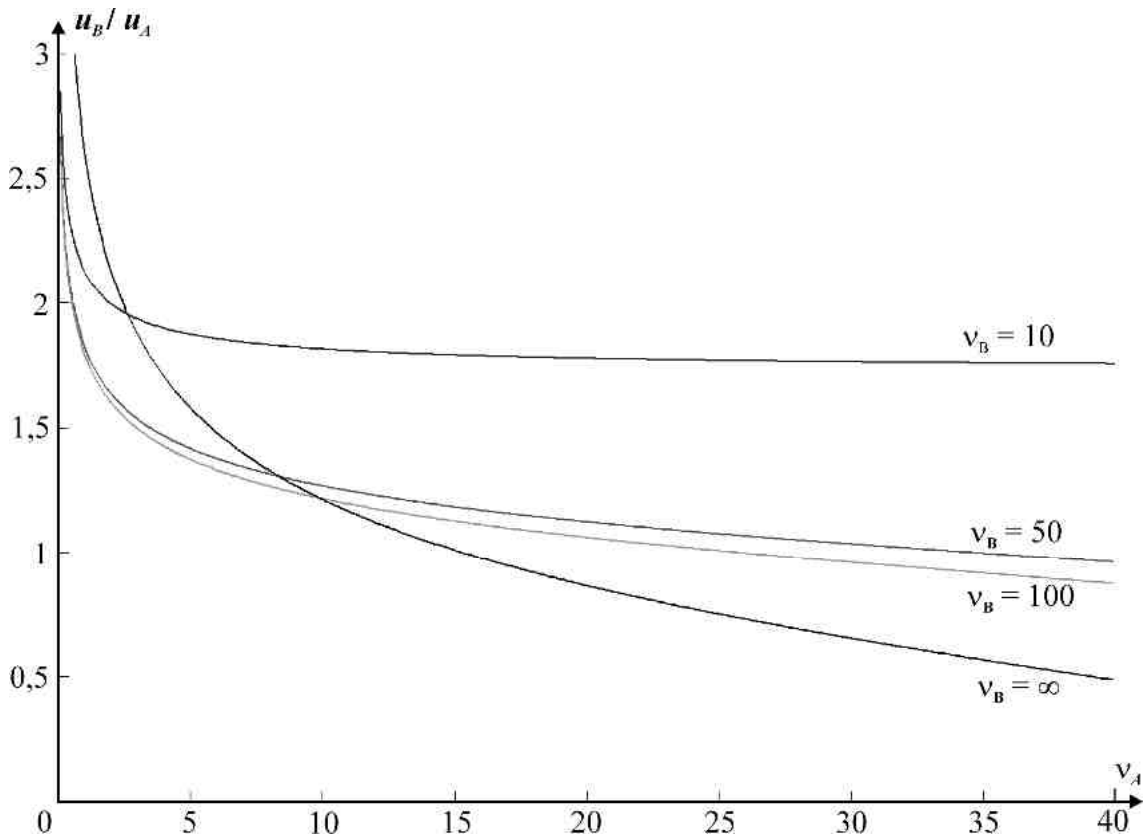
$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{u_A^4} = v_A \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{u_B^2}{u_A^2} + \frac{u_B^4}{u_A^4} \right) = v_A \cdot (1 + 2 \cdot r_{BA}^2 + r_{BA}^4) \quad (3.9)$$

a v případě konečných stupňů volnosti na

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\frac{u_A^4}{v_A} + \frac{u_B^4}{v_B}} = \frac{1 + 2 \cdot \frac{u_B^2}{u_A^2} + \frac{u_B^4}{u_A^4}}{\frac{v_B + v_A \cdot \frac{u_B^4}{u_A^4}}{v_A \cdot v_B}} = \frac{1 + 2 \cdot r_{BA}^2 + r_{BA}^4}{\frac{1}{v_A} + \frac{r_{BA}^4}{v_B}} \quad (3.10)$$

Konečné i nekonečné stupně volnosti nejistoty typu B byly použity pro porovnání, používaného přístupu  $\nu_B = \infty$  a přístupu uvažovaného v kapitole 3.1.6.1. Pro demonstraci byly konečné stupně volnosti zvoleny  $\nu_B = 10, 50$  a  $100$ , jako reprezentanti malých, středních a relativně vysokých stupňů volnosti. V rovinách určených těmito stupni volnosti byly provedeny řezy Obr. 31 a tím vznikl Obr. 32.

Pro  $\nu_A = 1$  stupeň volnosti vychází minimální  $u_B/u_A$  poměr roven 2,61 a pro dva stupně volnosti vychází tento poměr 2,16. Závěr by mohl znít, že pokud je nejistota typu A nejméně třikrát menší než nejistota typu B, tak není potřeba provádět měření více jak dvakrát. To je samozřejmě nesmysl, protože minimální počet stupňů volnosti použitelný pro statistiku je 2 a pro měření je absolutní minimum 6 [3]. Proč tedy dává vztah W-S takovéto výsledky? Podle [63] je Welch-Satterthwaitův vztah pro nižší stupně volnosti nepoužitelný kvůli jeho aproximativní povaze. Dle mého názoru je nemožné s nižšími stupni volnosti pracovat, protože nejistota typu A, spočítaná pouze ze dvou či ze tří měření není při výpočtech na hladině 95 % použitelná. A to z prostého důvodu, že další naměřená hodnota by mohla změnit odhad nejistoty typu A, ale také odhad hodnoty měřené veličiny do takové míry, že by se mohlo ukázat, že předchozí odhady byly zcela mimo i včetně nejistoty měření. Toto je neoddiskutovatelné zejména v případech, kdy měříme velice přesným přístrojem, ale další náhodné vlivy na měření způsobují velké kolísání naměřených hodnot. Z toho vyplývá, že z Obr 32. můžeme odčítat až od hodnoty 5 na ose X.



Obr. 32: Minimální poměr  $u_B/u_A$  a  $\nu_A$  pro dosažení 61 efektivních stupňů volnosti při různých  $\nu_B$

V každém případě tedy musíme počítat nejistoty typu A z dostatečného počtu opakování měření. Pakliže dodržíme toto pravidlo a uvažujeme nekonečné stupně volnosti, tak v případě, že je nejistota typu B alespoň dvakrát větší než nejistota typu A,

lze použít koeficient krytí  $k = 2$  pro úroveň konfidence 95 %. Jestliže je nejistota A větší než ve zmíněném případě, tak je nutné efektivní stupně volnosti spočítat ze vztahu (2.28). Z Obr. 32. je zřejmé, že i v případech, kdy budeme dle kapitoly 3.1.6.1 uvažovat konečné stupně volnosti, lze předpoklad  $k = 2$  při  $u_B/u_A \geq 2$  použít. Je totiž platný i pro  $\nu_B = 10$ , takže riziko podhodnocené nejistoty je prakticky nulové.

Předchozí analýzu lze shrnout do následujících doporučení pro případ přímého měření: V případě, kdy je poměr  $r_{BA}$  větší než 2, tak je plná možnost použití aproximace koeficientu krytí, v případě, že je poměr  $r_{BA}$  v intervalu mezi 1 a 2, tak je možnou aproximaci použít pouze za předpokladu, že  $\nu_A, \nu_B \geq 15$ . V případě, kdy je  $r_{BA}$  mezi hodnotami 0,5 a 1 je aproximace možné pouze v případě velmi vysokých  $\nu_A$  (více než 50) a to ještě za předpokladu, že  $\nu_B$  neklesnou pod únosnou míru (též 50). V případě, že je nejistota typu A více jak dvakrát větší, než nejistota typu B, tak aproximaci použít nelze a je třeba vypočítat koeficient krytí podle Welch-Satterthwaitova vztahu. Vše je přehledně shrnuto v Tab. 3.2.

Tab. 3.2: Použitelnost aproximace koeficientu krytí v případě přímých měření

poměr $u_B / u_A$	Použitelnost aproximace koeficientu krytí ( $k = 2$ pro $p = 95 \%$ )
$<2; \infty$ )	plná
$<1; 2)$	pro $\nu_A, \nu_B \geq 15$
$<0,5; 1)$	pro $\nu_A, \nu_B \geq 50$
$<0; 0,5)$	nepřípustná

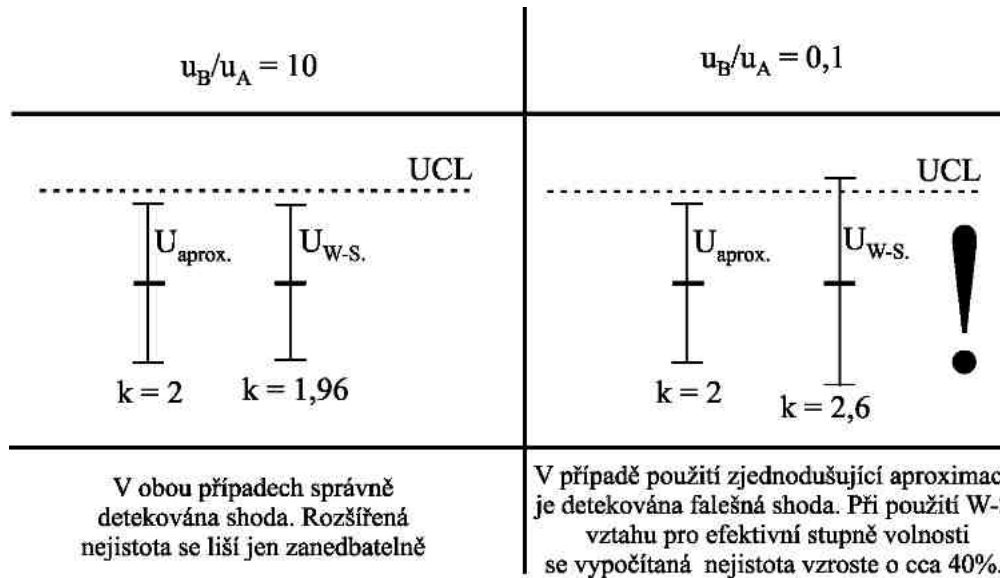
Pokud ale hovoříme o aproximaci, je nutno si uvědomit fakt, že v případech kdy je její použití bezpečné, je stanovená nejistota větší než skutečná. Proto v případech, kdy je primárním cílem co nejmenší nejistota, (což je velká část praktických měření), je třeba vždy používat S-W vztah (2.28). V mnoha případech totiž obdržíme pro konfidenční úroveň 95 % koeficient krytí rovný 1,96. V případě konfidenční hladiny 99 % je tento jev ještě markantnější. Pokud opravdu chceme pravděpodobnost 99 % a ne  $3\sigma$ , tedy 99,73 %, tak bude  $k < 3$ . Při vyšších efektivních stupních volnosti bude koeficient krytí dokonce menší než 2,7. V nedávné praxi se  $k = 3$  používal právě proto, že na vyšších hladinách pravděpodobnosti začíná hrát roli celá řada dalších faktorů, z nichž některé nejsou při výpočtu kombinované nejistoty dostatečně zahrnuty, a nadsazení koeficientu krytí mělo tento nedostatek eliminovat. To znamená, nemožnost exaktního vyčíslení se vyrovnávala pomocí rozumného navýšení koeficientu krytí a tím byla zajištěna spolehlivost výpočtu. V dnešní době jde ale o postihnutí všech působících faktorů, a to ať již různých minoritních zdrojů nejistoty, tak i všech podrobností při výpočtu nejistoty. Jedině tak se dá totiž vypočítat nejistota pro vyšší hladiny konfidence (např. pro  $4\sigma$  - 99,9936 %) tak, aby měla rozumnou velikost, tedy aby nebyla nadsazená a zároveň, aby pokrývala hodnotu měřené veličiny opravdu s takto vysokou pravděpodobností.

Pokud posoudíme běžně doporučované postupy z pohledu provedené analýzy, tak můžeme prohlásit, že jsou v mnoha případech adekvátní, ale bez kontroly všech vstupních předpokladů hrozí, že bude nejistota podhodnocená. Samozřejmostí je pak nejistota nadhodnocená, která je daní za zjednodušený postup výpočtu koeficientu krytí. Vždy je potřeba přihlídnout k tomu, za jakým účelem měříme. Pokud je potřeba znát přesnost měření, ale není kritické, když tuto nejistotu v řádu procent nadhodnotíme či podhodnotíme, tak je možné použít poučku zmiňovanou v [20] a to: „Nastane-li případ,



který se opakovaně vyskytuje v praxi, je možné předpokládat, že  $k = 2$  poskytne interval mající úroveň konfidence přibližně 95% a  $k = 3$  interval s úrovní konfidence přibližně 99%. Přičemž případem který se často vyskytuje v praxi je zřejmě myšleno to, že dobře známe působící vlivy a jejich dopad, a tudíž můžeme uvažovat vysoké stupně volnosti, které automaticky možnost aproximace umožňují.

Jako závěrečné shrnutí diskutovaného problému může posloužit následující Obr. 33.



Obr. 33: Porovnání rozšířených nejistot, určených na základě aproximovaného a vypočteného koeficientu krytí, při různých poměrech nejistoty typu A k nejistotě typu B

Na Obr. 33 je vidět, že pokud nastane případ, kdy převládá podíl nejistoty typu B, což je v praxi nejčastější situace, tak je rozdíl mezi zjednodušujícím  $k = 2$  a exaktně vypočítaným koeficientem krytí zanedbatelný. Pokud ale bude mít nejistota typu A nad nejistotou typu B navrch, nelze zjednodušení  $k = 2$  bez analýzy používat, protože může dojít k podhodnocení rozšířené nejistoty. Po pochopení tohoto problému lze pro rozhodnutí o použitelnosti koeficientu krytí  $k = 2$  používat již uvedenou tabulku Tab. 3.2.

### 3.2 Kalibrační intervaly

V následujícím textu budou porovnány metody popsané v kap. 2.2.3.1 (algoritmická A3 metoda) a v 2.2.3.2 (statistická metoda Weibullova rozložení). Porovnání bude provedeno na úrovni spolehlivosti 95 %. Tato úroveň může být označena jako přehnaně vysoká, protože v průmyslu se používají i hodnoty 80 a 85 % [57]. V současné době se ve stálé snaze o co nejpřesnější správný výsledek již na těchto nízkých hladinách spolehlivosti nemůžeme pohybovat. Byl by úplný nesmysl počítat rozšířenou nejistotu měření na konfidenční úrovni 95 nebo 99% a přitom měřit měřidlem, které má dvacetiprocentní šanci, že jeho metrologické charakteristiky jsou mimo deklarované hodnoty.

Na druhé straně je pravda, že kalibrace a měření jsou jen nástrojem, který nám slouží k dosažení dalších cílů. Požadavky na metrologický systém je nutno vždy nastavit vzhledem k těmto cílům. Pokud tedy aplikace nevyžaduje vysokou míru spolehlivosti, tak není potřeba ji vyžadovat.

#### 3.2.1 Porovnání vybraných metod

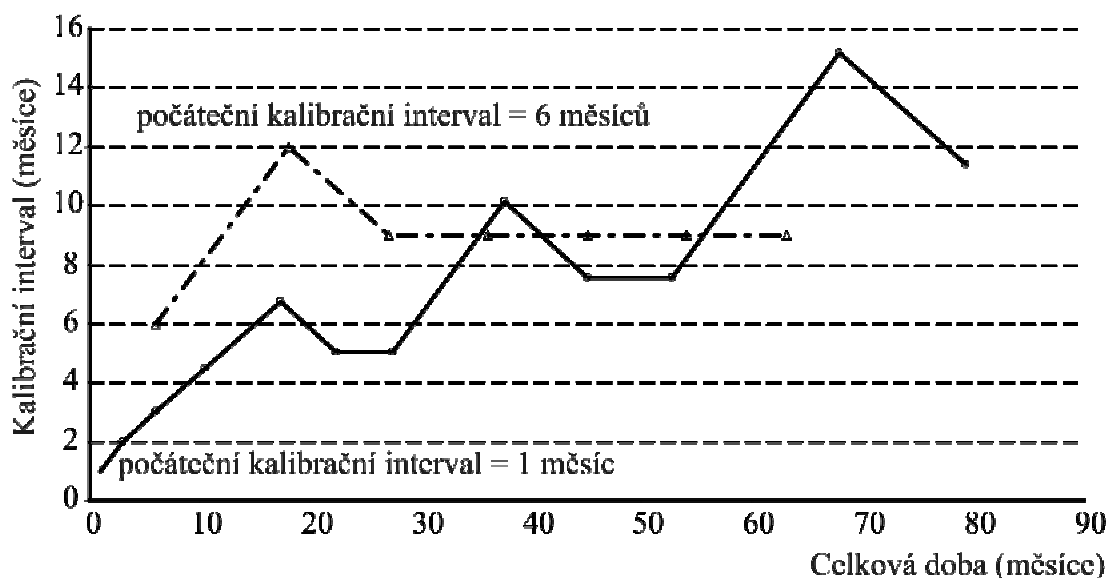
Porovnávat různé metody návrhu kalibračních intervalů může být obtížné, protože pracují na různém principu. Můžeme se ale pokusit porovnat přístup algoritmické metody A3 popsaný v kap. 2.2.3.1 s přístupem statistické metody využívající Weibullova rozložení. Můžeme přímo použít příklad z kap. 2.2.3.2 (Tab. 2.2, Obr. 11)

Při postupu dle algoritmu A3 na hladině spolehlivosti 95 % a při prvním kroku kalibračním intervalu 1 měsíc dostaneme následující Tab 3.3:

Tab 3.3 vývoj kalibračního intervalu pro soubor 100 měřidel (viz Tab 2.2) a spolehlivost 95%

Délka kalibračního intervalu (měsíce)	Celková doba (měsíce)	Průměrný kalibrační interval (měsíce)	Počet OK/Počet NOK přístrojů	Délka kalibračního intervalu (měsíce)	Celková doba (měsíce)	Průměrný kalibrační interval (měsíce)	Počet OK/Počet NOK přístrojů
Základní kalibrační interval je 1 měsíc				Základní kalibrační interval je 6 měsíců			
1,00	1,00	1,00	100/0	6,00	6,00	6,00	100/0
2,00	3,00	1,50	100/0	12,00	18,00	9,00	99/1
3,00	6,00	2,25	100/0	9,00	27,00	9,00	98/1
4,50	10,50	3,38	100/0	9,00	36,00	9,00	94/4
6,75	17,25	5,06	99/1	9,00	45,00	9,00	91/3
5,06	22,31	5,06	98/1	9,00	54,00	9,00	90/1
5,06	27,38	5,06	98/0	9,00	63,00	9,00	
10,13	37,50	7,59	94/4				
7,59	45,10	7,59	91/3				
7,59	52,69	7,59	91/0				
15,19	67,88	11,39	90/1				
11,39	79,27	11,39					

Na následujícím Obr. 34 jsou graficky znázorněny údaje s předcházející Tab. 3.3



Obr. 34: Vývoj kalibračních intervalů pomocí algoritmické metody A3 s různým počátečním krokem (1 měsíc; 6 měsíců)

Z grafu je vidět, že velmi záleží na tom, s jakým kalibračním krokem algoritmická metoda začíná. Po pěti letech je kalibrační interval 11,39 měsíce, resp. 9 měsíců. Po stejném období navrhuje statistická metoda využívající Weibullovo rozložení kalibrační interval 36,57 měsíce, což je zásadní rozdíl. Různé výsledky jsou dané jinou datovou základnou. I když jsme použili stejné přístroje, které selhaly za stejnou dobu, tak v konečném důsledku provedla statistická metoda 5753 kalibrací. Metoda A3 provedla 1161 kalibrací (pro výchozí krok 1 měsíc), resp. 672 kalibrací (pro výchozí krok 6 měsíců). Protože kalibrační měření jsou drahá, tak uvedené počty kalibrací budou mít zásadní vliv na celkovou výši nákladů na kalibrace.

V dalších letech by se situace mohla začít měnit, protože statistická metoda by zajistila skoro 4x menší frekvenci kalibrace než metoda algoritmická. Problémem je, že v tomto období začne být zařízení morálně zastaralé a náklady investované do získání datové základny se nevrátí.

Uvedené srovnání potvrzuje výchozí premisu, že statistické metody mají zásadní problém ve sběru dat. Algoritmické metody mohou zase dávat výsledky, které jsou od reálné situace celkem vzdálené.

### 3.2.1.1 Optimalizace nákladů na kalibrace

Při výpočtu kalibračních intervalů se velice často opomíjí náklady na kalibraci. Většina metod kalibračních intervalů pracuje s prodlužováním nebo zkracováním kalibračního intervalu podle toho, jaké jsou výsledky kalibrace. Nebývá však již zvykem pohlédnout na problém kalibračních intervalů z ekonomického hlediska. Může se zdát, že z ekonomického hlediska je nejvýhodnější mít kalibrační intervaly co nejdelší, ne-li žádné. Toto je mylná představa. Ve skutečnosti může být kratší interval mnohem levnější. Je to proto, že kromě nákladů spojených s kalibrací musíme počítat s náklady, které vzniknou vinou toho, že nekalibrované měřidlo způsobí v lepším případě reklamaci výrobku, v horším případě selhání výrobku v aplikaci s následkem havárie. Z tohoto pohledu by se mohlo zdát výhodné provádět kalibraci co nejčastěji.

Ani tento postoj není nejvhodnější, protože ceny za kalibraci nejsou vůbec zanedbatelné. Často jsou skryté v režii a nedostává se jim pozornosti při celkovém snižování nákladů podniku.

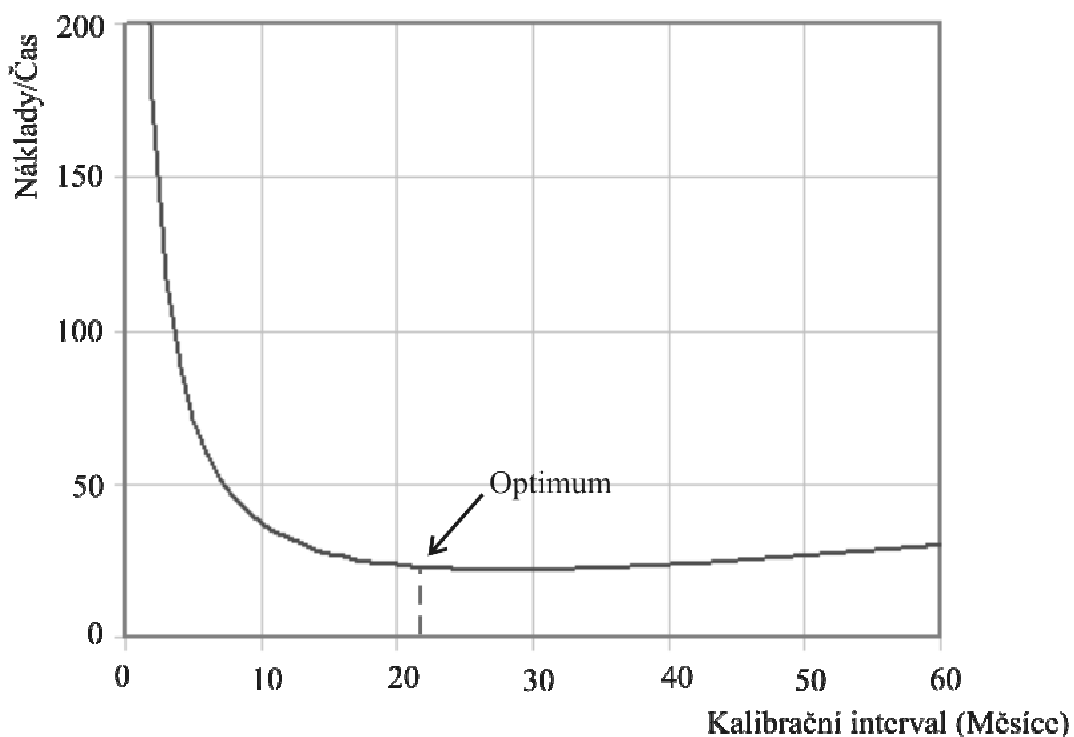
Řešení spočívá ve vyvážení kalibračních intervalů a možných rizik způsobených měřidlem s metrologickými parametry mimo specifikace. Vzhledem k tomu, že chceme minimalizovat ekonomickou ztrátu, tak si musíme stanovit ekonomickou ztrátovou funkci, kterou budeme minimalizovat.

Pokud mluvíme o ztrátách, tak si musíme uvědomit, že nemusí být jenom finanční. Případné havárie, či nekvalitní výrobky sebou nenesou jenom ekonomická rizika, ale i rizika bezpečností. V případě velkých průmyslových zařízení, či předmětů hojně užívaných širokou veřejností je riziko poranění a ztrát na lidských životech. Pokud je z předchozích zkušeností například známo, že havárie stojí 15 miliónu korun a 0,5 lidského života, je třeba riziko zranění, či dokonce úmrtí obsluhujícího personálu zahrnout také do návrhu kalibračních intervalů.

Když máme k dispozici data o tom, kdy přestal měřicí přístroj vyhovovat požadavkům, tak na základě těchto dat můžeme určit parametry Weibullova rozložení a z nich zase odhadnout vhodný kalibrační interval tak, aby pravděpodobnost vybočení měřicího přístroje během doby mezi kalibracemi byla podle našich požadavků [47]. Konkrétní postup byl prezentován v kap. 2.2.3.2

Dle [57] lze údaje vypočítané z Weibullova rozložení dále využít k dosažení co nejnižších nákladů na kalibraci. Stačí sestavit rovnice, ve které v čitateli budou v daném čase plánované náklady na kalibraci násobené spolehlivostí měřicího zařízení plus neplánované náklady spojené se selháním měřicího vybavení násobené nespolehlivostí tohoto vybavení, ve jmenovateli pak bude střední doba pro vybočení zařízení mimo požadované meze.

Tento výpočet lze demonstrovat na příkladě z kap. 2.2.3.2 (Tab. 2.2, Obr. 11). Zde nám vyšlo, že pro 90% hladinu pravděpodobnosti musí být kalibrační interval 50,35 měsíců, pro 95% hladinu 36,57 měsíců a pro 99% hladinu 17,73 měsíců. Jakou spolehlivost ale máme zvolit? To záleží na nákladech na kalibraci a na nákladech na selhání měřidla. Pokud by náklady na kalibraci byly 350 € a náklady na incident způsobený měřidlem s neshodnými metrologickými charakteristikami 10000 €, tak by situace vypadala následovně:



Obr. 35: Závislost nákladů na kalibračním intervalu, vypracováno za pomoci [49]

Na Obr. 35 je vidět, že při velice častých kalibracích (0-10 měsíců) jsou celkové náklady velice vysoké. Naopak při dlouhých kalibračních intervalech (3 a více let) začíná stoupat riziko nákladů způsobených neshodným přístrojem. Optimální doba pro kalibraci je 22,26 měsíce. V praktické aplikaci bychom tedy volili kalibrační interval dva roky. Znamenalo by to úroveň konfidence 98,32 % (pro 22,26 měsíce), respektive 98,01 % (pro dva roky). Důležité je si uvědomit, že jsme úroveň spolehlivosti nestanovovali, ale vyplynula z nákladů na kalibraci.

Kdyby náklady na kalibraci byly obrovské a přitom nehrozila prakticky žádná velká ztráta v případě neshodného měření, tak by výše popsaný postup směřoval ke kalibračnímu intervalu, který by přesahoval celkovou životnost měřidla. A to i za cenu velice nízké spolehlivosti měřidla. Toto je úskalí, které je potřeba při práci s nákladovou analýzou vnímat.

Náš cíl může být minimalizace nákladů, ale náš konfirmační systém by měl stanovovat pro danou skupinu měřidel minimální požadovanou spolehlivost. Pokud budeme používat výše zmíněnou nákladovou funkci, tak dle mého názoru konfirmační systém musí minimální spolehlivost definovat. V opačném případě by totiž hrozilo, že sice budeme mít minimální náklady, ale zato systém měření v podniku nebude splňovat základní požadavky systému ISO 9000. Nebudou totiž zajištěny metrologické parametry měřidel.

### 3.2.2 Volba kalibračních intervalů – shrnutí

Z výše uvedených závěrů plyne jasná potřeba kombinování více přístupů. Uvedené metody si nekonkurují, spíše se doplňují.

Dle mého názoru je nejvhodnější následující postup: Začít s pevnými kalibračními intervaly, které mají návaznost na ostatní procesy v podniku. V případě, že by některý přístroj nevyhověl, tak by bylo vhodné okamžitě nasadit algoritmičtější metodu pro

zkrácení intervalu. Zároveň by se v četnějších intervalech prováděl test pomocí „metody černou skříňkou“. Data z tohoto testu by se zaznamenávala a po načerpání dostatečného množství porovnávacích měření by se použila jako vstup do statistické metody.

U kritických měřicích zařízení, u kterých špatně změřená hodnota může znamenat velkou finanční ztrátu, by se měla dávat přednost četnějšímu kalibrování. Ideální by bylo zařazení ověřování metodou černé skříňky před každým měřením.

## **4 PRAKTICKÁ APLIKACE: ZKOUŠENÍ PŘEPĚŤOVÝCH OCHRAN PROUDOVÝM IMPULSEM 8/20**

Postupy popisované a analyzované v kapitolách 2 a 3 vyžadují rozsáhlé provozní ověření, což mnohonásobně přesahuje možnosti této disertační práce. Proto byla pro demonstraci základních principů vybrána pouze jedna aplikace v oblasti testování přepětových ochran. Tato aplikace byla vybrána po konzultaci se školitelem, který navrhl zpracování měření ve akreditované zkušební laboratoři fy HAKEL spol. s r. o., zejména pro vhodnou povahu měření, přístrojovou vybavenost a vstřícnost této firmy.

Volba této aplikace byla plně v souladu se zadáním disertační práce, které vyžadovalo aplikaci navržených postupů na měření v elektrotechnické oblasti se zaměřením na zajišťování jakosti. Testování přepětových ochran tomuto zadání odpovídá a zároveň jde o oblast, ve které je potřeba vysoká konfidenční úroveň, protože případné selhání výrobků může mít za následek velké finanční ztráty, či dokonce újmu na zdraví či životě. Proto je zajišťování a správné vyjadřování výsledku nezbytné. Významnou částí je zejména vyjadřování nejistoty měření a posuzování shody.

Vybraná aplikace je z oblasti zajišťování kvality elektrické energie a elektromagnetické kompatibility. V následující kapitole 4.1 jsou tyto oblasti blíže nastíněny. Toto alespoň částečné přiblížení problematiky je nezbytné pro následnou analýzu měření přepětových ochran a posuzování jejich shody.

### **4.1 Úvod do problematiky zajišťování kvality elektrické energie**

Kvalita elektrické energie je podstatná pro provoz elektrických zařízení, jakékoliv odchylky od požadovaných charakteristik mohou ohrozit funkci těchto zařízení, v některých případech i jejich provozuschopnost. U elektrické energie dodávané koncovým uživatelům se sleduje několik parametrů, jsou to zejména amplituda, frekvence, harmonické zkreslení, flickr. Podstatným parametrem je také trvání a četnost výpadků v dodávce elektrické energie. U zajišťování kvality elektrické energie narážíme často na fakt, že většinu parametrů ovlivňují i sami zákazníci. Téma zajišťování kvality elektrické energie je zajímavým způsobem zpracováno v [75].

Všechny parametry jsou velice důležité, ale u většiny elektrických přístrojů se zaměřujeme zejména na amplitudu, tedy na možné přepětí a podpětí. Oba případy mohou způsobit nefunkčnost zařízení, přepětí dokonce v řadě případů i jeho zničení. Ochrana proti přepětí je tedy nezbytnou součástí rozvodu elektrické energie. Podrobněji se této problematice věnuje kap. 4.1.2.

Zákonným přepisem [41] je ve smyslu vládního nařízení [78] předepsána tzv. elektromagnetická kompatibilita (EMC). Podstatou EMC je, že žádný přístroj nesmí rušit a nesmí být rušen elektromagnetickým zářením. Sleduje se tedy vyzářování přístroje do rozvodné sítě a okolního prostředí a zároveň se testuje odolnost přístroje k případnému rušení. Do této oblasti spadá i přepětí a hovoří se o něm jako o podmnožině problematiky EMC. Elektromagnetická kompatibilita je blíže popsána v kap. 4.1.1.

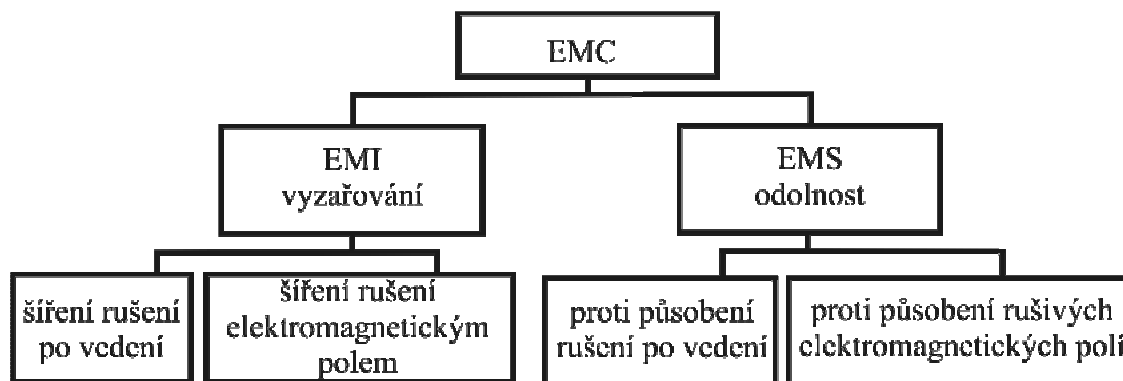
Protože je zajišťování kvality elektrické energie klíčovou oblastí pro celý průmysl, jsou v současné době požadavky na jednotlivé parametry elektrické energie standardizovány. Standardy se postupem času upravují a zpřísňují, protože požadavky na kvalitu elektrické energie vzrůstají. V současné době upravují tuto oblast standardy [89], [90], [91], [92], [93] a [94].

### 4.1.1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita je obor, který se zabývá zabezpečením maximální spolehlivosti funkce elektrických a elektronických zařízení. Již bylo uvedeno, že jde hlavně eliminaci možného rušení přístrojem a zároveň o odolnost přístroje vůči rušení. V současné době, kdy jsou přístroje stále více kompaktnější, složitější a zároveň výkonnější, vystupuje problematika EMC do popředí zájmu.

V této oblasti je nutná mezinárodní spolupráce, protože jinak by výrobky vyrobené v různých zemích nebylo možno spolehlivě provozovat v ostatních zemích. Pro ČR jako člena EU je závazná direktiva [77], jejímž cílem je prosazení podmínek elektromagnetické kompatibility v členských státech. V naší legislativě je tento právní akt realizován pomocí zákona č.22/97 [78], kterým se stanovují technické požadavky na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility.

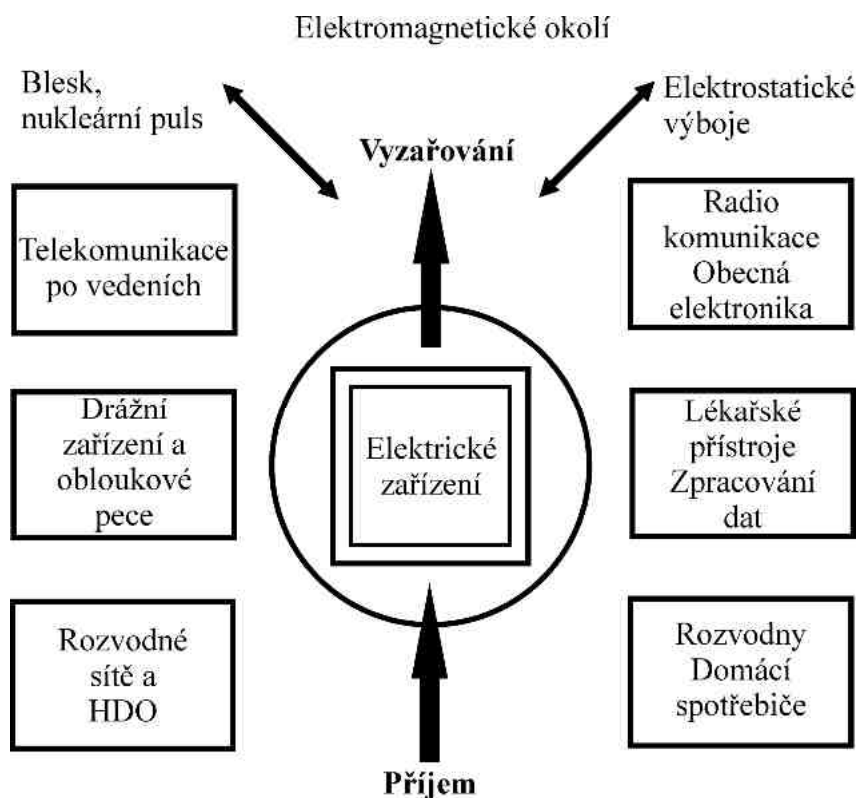
Problematika EMC se dělí na dvě oblasti. Oblast, která souvisí s veškerým rušením, které přístroj vytváří nebo může vytvářet, se označuje jako EMI – elektromagnetické vyzařování. Odolnost vůči rušení se označuje anglickou zkratkou EMS – elektromagnetická odolnost. Toto rozdělení lze jednoduše znázornit takto:



Obr. 36: Rozdělení EMC (Zpracováno dle [76])

Z obecného hlediska rozeznáváme dvě entity: elektrické zařízení a elektromagnetické okolí. Zajímají nás vztahy mezi nimi a jejich vzájemná interakce. Situace je podrobněji znázorněna na Obr. 37.





Obr. 37: Vztahy posuzované v rámci elektromagnetické kompatibility  
(Zpracováno dle [76])

Vyzařování i příjem lze také rozdělit na bezdrátovou část a část, která se šíří po galvanických cestách. U bezdrátového vyzařování a příjmu se elektromagnetická kompatibility zajišťuje stíněním, u galvanických cest je pro zabránění vyzařování a zamezení rušení potřeba použít filtrů.

Dle [76] nestačí k zajištění elektromagnetické kompatibility jenom rozumět problematice a mít v zásobě technická řešení a technologické postupy. Je třeba na celou oblast elektromagnetické kompatibility pohlížet systémově a vytvořit obecné postupy tak, aby bylo zabezpečeno splnění požadavků. Jednotlivé fáze tohoto postupu lze popsat takto:

- stanovení potenciálních zdrojů rušení
- vymezení elektromagnetického prostředí
- určení požadavků na spolehlivost provozu zařízení jako celku i jeho částí, klasifikace poruchových stavů a jasné stanovení jejich přístupnosti v různých režimech činnosti
- stanovení citlivých prvků zařízení
- analýza všech možných elektromagnetických vazeb, stanovení kritických cest šíření rušivých veličin
- návrh koncepce ochrany zařízení proti rušení, určení topologie systému, vymezení jednotlivých zón ochrany zařízení
- určení požadavků na odrušení v jednotlivých zónách ochrany neboli specifikace elektromagnetického prostředí v jednotlivých zónách
- opatření pro zamezení průniku rušivých napětí a proudů po vodičích přestupujících stínící pláště

- ověřování dílčích opatření měřeními a zkouškami
- provedení komplexu zkoušek a měření ověřujících výslednou celkovou odolnost zařízení

Dodržení tohoto postupu je dobrým předpokladem k zajištění elektromagnetické kompatibility. Elektrická a elektronická zařízení se ve stále větší míře podílejí na našem každodenním životě a začínáme na nich být čím dál více závislí. Nejde jen o funkčnost či nefunkčnost, ale také o potencionální ohrožení dat skladovaných v elektronické podobě. Elektromagnetickou kompatibilitu je potřeba zajišťovat všude tam, kde mohou vzniknout finanční ztráty nebo kde může být ohrožen lidský život či zdraví. Jedním z nejnebezpečnějších jevů je tzv. přepětí, kterým se zabývá následující kapitola.

#### **4.1.2 Přepětí v elektrické síti a ochrana proti němu**

Přepětí je nebezpečné tím, že může nejenom ohrozit funkci měřicího zařízení, ale může ho poškodit či dokonce zničit. Přepětí je definováno jako jakékoliv časově závislé zvýšení síťového napětí nad odpovídající vrcholovou hodnotu. Vrcholová hodnota se odvozuje z největšího napětí pro zařízení.

Přepětí jsou vždy přechodné jevy a dělíme je podle jejich příčin a průběhu na [76]:

- spínací přepětí: přepětí způsobené spínací operací, zkratem nebo jinou příčinou se stejným průběhem. Tato přepětí jsou zpravidla silně tlumená a trvají krátkou dobu
- atmosférické přepětí: přepětí způsobené výbojem atmosférické elektřiny (bleskem) nebo jinou příčinou s podobným průběhem. Tato přepětí jsou zpravidla unipolární a trvají krátkou dobu
- dočasné přepětí: oscilační přepětí, které má poměrně dlouhou dobu trvání a je buď netlumené, nebo jen slabě tlumené. Může být způsobeno například odpojením zátěže

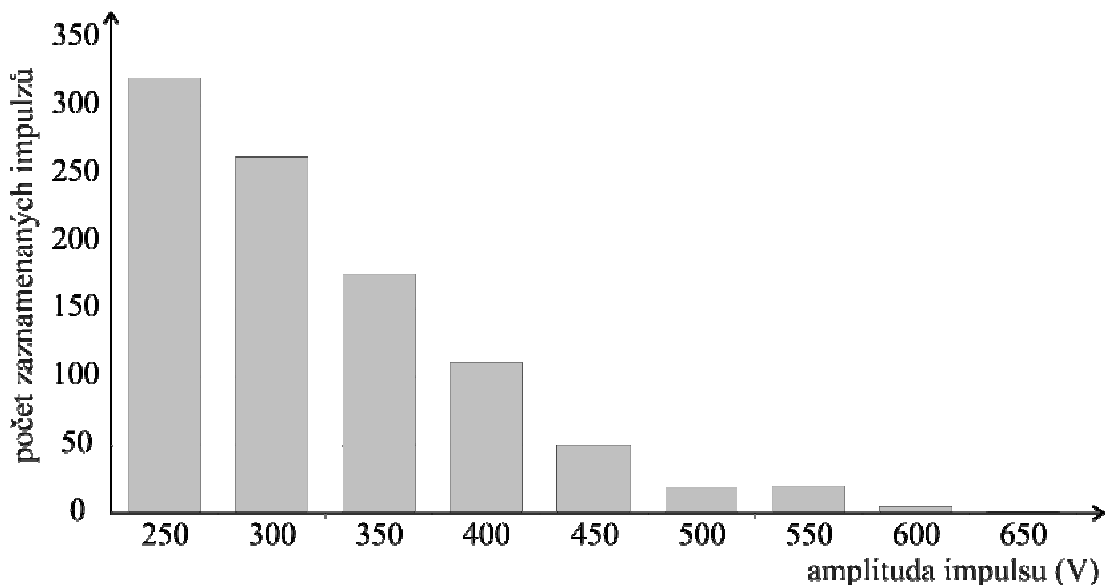
Nejnebezpečnějším druhem přepětí je bezesporu atmosférický blesk, který je charakteristický jak vysokým napětím v řádu stovek kilovoltů, tak obrovským proudem v řádu až stovek kiloampérů. Blesky mohou ublížit jak přímým, tak i nepřímým úderem. Riziko přímého či nepřímého zásahu bleskem je poměrně velké. Nerizikovější jsou zařízení umístěná nad terénem nebo na horách, kde lze počítat i s deseti údery ročně [79]. Ale i v oblastech, které nejsou přímo exponované, je riziko přepětí velké. Zejména v letním období bývají časté bouřky, při kterých jsou běžné výboje na celém území ČR, a také si musíme uvědomit, že přepětí způsobené nepřímým zásahem se může vyskytnout v poměrně v dost velké vzdálenosti od samotného úderu. Jako příklad takové letní bouře může posloužit příklad zobrazený v příloze 10B, na kterém je vidět rozsáhlá fronta při které bylo zaznamenáno téměř šest tisíc úderů do země na sledovaném území za hodinu a půl.

Nebezpečí přepětí způsobené bleskem je tedy reálné a nevyplatí se ho podceňovat. Základním prostředkem ochrany jsou tzv. *přepětíové ochrany*, v zahraniční literatuře označované zkratkou SPD (Surge protection devices). Tato zařízení nemusí být koncipována pro 100 % bleskového proudu, protože základním předpokladem ochrany proti blesku je řádně uzemněný hromosvod. Ten zajistí svedení alespoň bleskového proudu do země. Dle [80] se zbytek proudu rovnoměrně rozdělí mezi přívody vstupující do objektu, tedy do vodičů elektrického vedení, kabelů informační a komunikační sítě a do kovových potrubí. V konečném důsledku je třeba dimenzovat ochrannou kaskádu

každého fázového vodiče vstupujícího do objektu na cca 4 % bleskového proudu. Dle [81] lze pro účely ochrany považovat za maximální bleskový proud 200 kA, a tedy pro typický objekt s topologií sítě TNC je dostačující ochrana dimenzovaná na cca 8 kA.

Pro plnou ochranu připojených spotřebičů ale nasazení pouze jedné ochrany na fázi nedostačuje. Proudová vlna, která se vedením při nepřímém zásahu bleskem šíří má velkou amplitudu a krátký průběh. Jednostupňová ochrana nedokáže okamžitě zareagovat a svést veškeré přepětí, proto se používá tzv. třístupňová ochrana, kdy u prvního stupně je důraz na svedení co největšího náboje a snížení napětí a od posledního stupně vyžadujeme co nejrychlejší reakce a snížení napětí na provozní úroveň. Druhý stupeň tvoří mezičlánek, který zvyšuje spolehlivost a snižuje cenu celkové ochrany. Podrobnější informace o dělení přepět'ových ochran do třídy I, II a III jsou popsány v IEC 64643-1 [82]

Nesmíme ale podceňovat ani malá přepětí. Zejména pro výpočetní techniku a komunikační síťové prvky představují tato přepětí hrozbu. Může dojít k výpadkům a resetům nebo k nevratnému poškození nákladného hardwaru. Na následujícím Obr. 38 je znázorněno reálné pozorování v běžné nízkonapět'ové síti v obchodech, hotelích a domácnostech.



Obr. 38: Četnost přepětí v síti NN za dobu jednoho týdne (měřeno ve více lokalitách)[76]

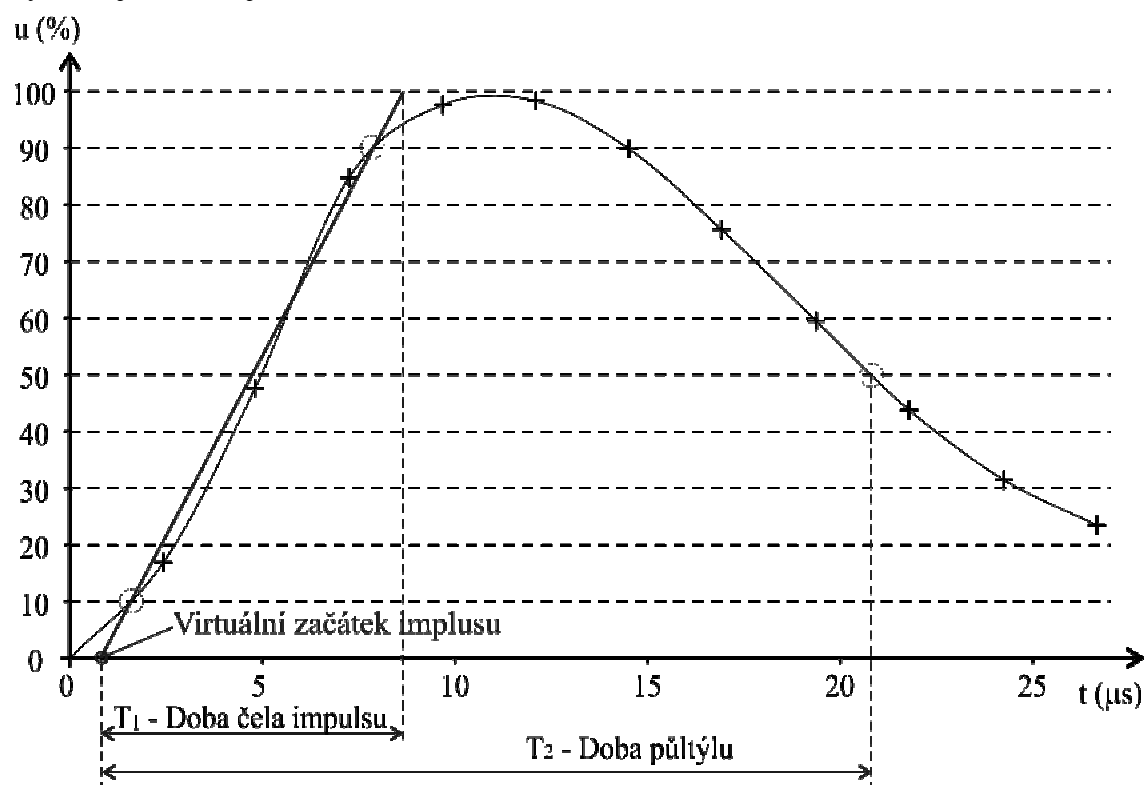
Z grafu je dobře patrné, že pulzy do výše 500 V nejsou v síti žádnou raritou. Tento fakt klade zvýšené nároky, jak na odolnost připojených zařízení, tak na ochranné síťové prvky.

Účelem této práce není podat úplný souhrn ochranných prvků a popis jejich principu. Pro informaci alespoň uvedme, že pro konstrukci svodičů přepětí se v dnešní době používají otevřená jiskřiště, hermeticky uzavřená jiskřiště, plynem plněné bleskojistky, varistory, omezovací diody nebo kombinace uvedených prvků. Pro ochranu spotřebičů se používají též tavné pojistky a vysokofrekvenční filtry.

## 4.2 Zkoušení přepět'ových ochran

Přepět'ové ochrany zajišťují bezpečnost lidí a jejich majetku. Z toho důvodu jsou na jejich zkoušení kladeny vysoké požadavky specifikované ve standardech IEC 61643-1 [83] a EN 61643-11 [84]. Tyto normy předepisují celou řadu zkoušek a postupů, které například zahrnují kondicionování ochrany pro zkoušku, testování teplotní stability ochrany, testy přetížení, mechanické odolnosti atd. Z hlediska nejčastěji zkoušených charakteristik je nejdůležitější měření zbytkového napětí  $U_p$  při proudovém impulsu 8/20  $\mu\text{s}$  a měření přeskovového napětí při napět'ovém impulsu 1,2/50  $\mu\text{s}$ .

Uvedené hodnoty znamenají charakteristický čas čela zkušební vlny  $T_1$  a charakteristický čas týlu zkušební vlny  $T_2$  uvedené ve tvaru  $T_1/T_2$ . Kromě časů čela a týlu vlny je zkušební ráz charakterizován také amplitudou. Situaci přehledně vysvětluje následující Obr. 39



Obr. 39: Napět'ový zkušební impuls 100 kV 8/20

Oba časy se počítají od tzv. virtuálního počátku impulsu. Je to místo, kde osu  $X$  protíná přímka určená dvěma body na náběžové straně vlny. Oba body jsou učeny jako procentní části maximální amplitudy, přičemž první bod z ní tvoří 10 % a druhý 90 %. O tohoto virtuálního počátku impulsu je  $T_1$  doba za kterou vlna dosáhne 90 % amplitudy a  $T_2$  je doba za kterou vlna po průchodu amplitudou poklesne na 50 % její hodnoty.

Pro proudový impuls je situace totožná s jediným rozdílem. První bod se neurčuje jako 10% amplitudy, a nalezneme ho v 30 % amplitudy.

Reálné zkušební generátory samozřejmě nemůžou dávat ideální průběhy. Konkrétní toleranční hodnoty provedení a tvaru impulsů jsou dány zejména standardy ČSN IEC 60-1 [97] a ČSN 61 000-4-5 [98]. Obsah těchto norem není třeba v této disertační práci dále rozvádět, uvedme jen, že tolerance pro napět'ovou vlnu 1,2/50  $\mu\text{s}$  je 30 %/20 % a tolerance pro proudovou vlnu 8/20  $\mu\text{s}$  je 20 %/20 %.

Při zkoušení zbytkového napětí  $U_p$  se postupuje následovně (Zpracováno dle [82]):

Pro třídy ochran I a II se stanoví přítomnost spínací součástky. Pakliže spínací součástka je přítomna, provede se zkouška proudovým impulsem 8/20 a zkouška napěťovým impulsem 1,2/50. V případě, že SPD neobsahuje spínací prvky, tak se provede pouze proudová zkouška. Pro třídu ochran III se provádí zkouška kombinovaným vlnou. Kombinovaná vlna znamená napěťový impuls 1,2/50 naprázdno a proudový impuls 8/20 nakrátko. Pro kombinovanou vlnu je nutné dodržet následující tolerance [83]:

Napěťový impuls 1,2/50 naprázdno  $U_{max} \pm 3 \%$ ,  $T_1 \pm 30 \%$ ,  $T_2 \pm 20 \%$

Proudový impuls 8/20 nakrátko  $I_{max} \pm 10 \%$ ,  $T_1 \pm 10 \%$ ,  $T_2 \pm 10 \%$

Vzhledem k tomu, že v následujících kapitolách bude testována ochrana třídy III, uvedeme alespoň stručně hlavní kroky testování kombinovanou vlnou (zpracováno dle nejnovější verze IEC 61643-1:2005 [83]):

a) Kombinovaná vlna se aplikuje na přepětovou ochranu, která je pod maximálním trvalým napětím  $U_c$ .

b) Pro ochrany určené pouze pro střídavé napájení se aplikují kladné impulzy fáze  $90^\circ \pm 10^\circ$  a záporné impulzy fáze  $270^\circ \pm 10^\circ$ .

c) Pro ochrany určené pouze pro střídavé napájení se aplikují záporné i kladné impulzy na ochranu pro trvalým maximálním napětím  $U_c$ .

d) Interval mezi jednotlivými impulzy musí být natolik dlouhý, aby se ochrana ochladila na teplotu okolí

e) Při testování napěťovým impulsem se použít násobky 0,1; 0,2; 0,5 a 1 deklarovaného napětí naprázdno  $U_{oc}$ . Jestliže je ochrana založena pouze na omezování napětí, tak se test může učinit pouze na napětí  $U_{oc}$ .

f) Tímto přepětím se ochrana zatíží 4x přičemž 2x kladně a 2x záporně.

g) Při každém impulzu se zaznamenává se průběh proudu tekoucího z generátoru do ochrany a výstupní napětí na ochraně

h) Měřené mezní napětí je maximální vrchol zaznamenaný během celé testovací sekvence.

Nutno podotknout, že takto koncipovaná zkouška ochran třídy III se provádí většinou pouze při prokazování shody s požadovanými předpisy. Při praktickém ověřování se zkouška přizpůsobuje konkrétním potřebám. Například se vynechává hlídání fáze pro ochrany střídavého napájení, volí se odlišné volba násobku maximálního napětí. Pro stresové testy ochrany se volí násobky větší než jedna, čímž se test přibližuje testování ochran třídy II.

### **4.3 Přepětová ochrana PK 2**

Pro praktické provedení testu byla zvolena přepětová ochrana s typovým označením Hakel PK 2, což je napěťová ochrana třídy III pro jmenovité napájecí napětí 230 V/ 50 Hz. Tato ochrana byla zvolena, protože je jednou z nejpoužívanějších ochran z produkce firmy Hakel s.r.o. a je u ní potřeba zabezpečit transparentní, rychlé a jednoznačné vyjadřování výsledků zkoušek. Výsledky těchto zkoušek slouží jako

zpětná vazba výrobnímu procesu a zkoušky se provádějí jak na výrobní úrovni, s použitím menších testerů, tak na úrovni laboratorní s využitím velkých generátorů.

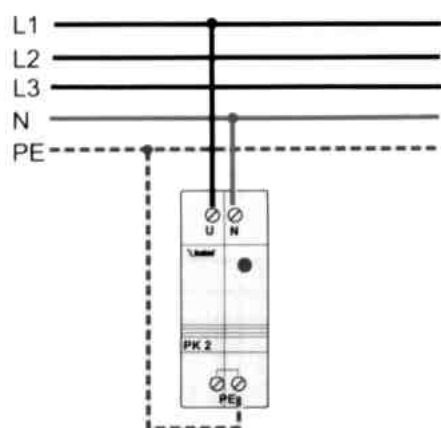
Zvolená ochrana PK2 je výrobcem charakterizována jako výkonná třípólová přepěťová ochrana určená pro univerzální použití k ochraně všech druhů elektrických zařízení připojených k síti nn proti účinkům pulzního přepětí. Je vhodná pro síť TNS i TNC. Na zvláštní objednávku zákazníka je možno požadovat tento typ i pro jiná provozní napětí než 230 V/50 Hz. Ochrana splňuje požadavky kladené na třídu III přepěťových svodičů dle ČSN EN 60 664 [95] a IEC 61643-1:1998 [82]. Z bezpečnostního hlediska splňuje příslušná ustanovení ČSN EN 61 010-41 [96]. Jako výkonové nelineární prvky jsou použity varistory s maximální svodovou schopností  $I_{\max}(8/20) = 8 \text{ kA}$  a speciální bleskojistky s maximální svodovou schopností  $I_{\max}(8/20) = 10 \text{ kA}$ . Eventuelní porucha varistoru je indikována vysunutím červeného terčíku mechanické tepelné pojistky, reagující na přehřátí varistoru nad teplotu 120 °C. [80]. V následující tabulce jsou uvedeny základní vybrané charakteristiky ochrany.

Tab. 4.1: Vybrané charakteristiky přepěťové ochrany PK2, dle katalogu výrobce [80]:

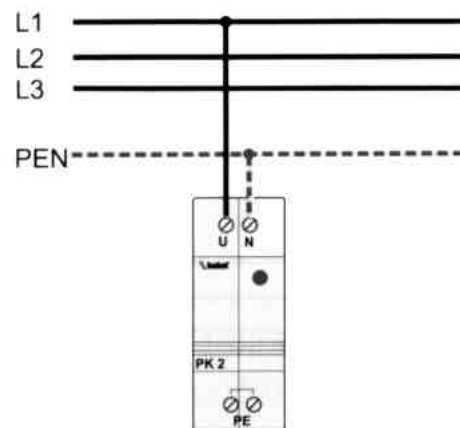
Třída svodiče dle IEC 61643-1:1998 [82] (2005 [83])	III
Použití pro síť	TNS, TNC
Jmenovité pracovní napětí ( $U_N$ )	230 V/ 50 Hz
Maximální trvalé pracovní napětí ( $U_C$ )	275 V/ 50 Hz
Maximální impulsní svodový proud $I_{\max}(8/20)$ ( $I_{\max}$ )	8kA (U/N, U/PE) 10kA (N/PE)
Ochranná úroveň při $I_{\max}$ ( $U_p$ )	< 1,2 kV (U/PE) < 500 V (N/PE)
Doba odezvy ( $t_A$ )	< 25 ns (U/N) < 100 ns (U/PE) < 100 ns (N/PE)
Doporučený průřez připojovaných vodičů	max. 2,5 mm <sup>2</sup>
Hmotnost (m)	80 g
Stupeň krytí	IP 20
Způsob montáže	lišta DIN 35 mm
Materiál pouzdra	SLOVAMID 6FRC2
Pracovní teplota ( $\vartheta$ )	-40 až +80 °C

Pro ochranu PK 2 jsou doporučena následující zapojení:

## System TNS

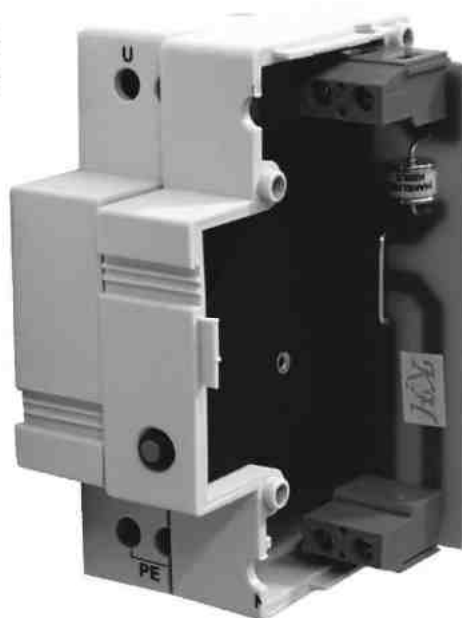
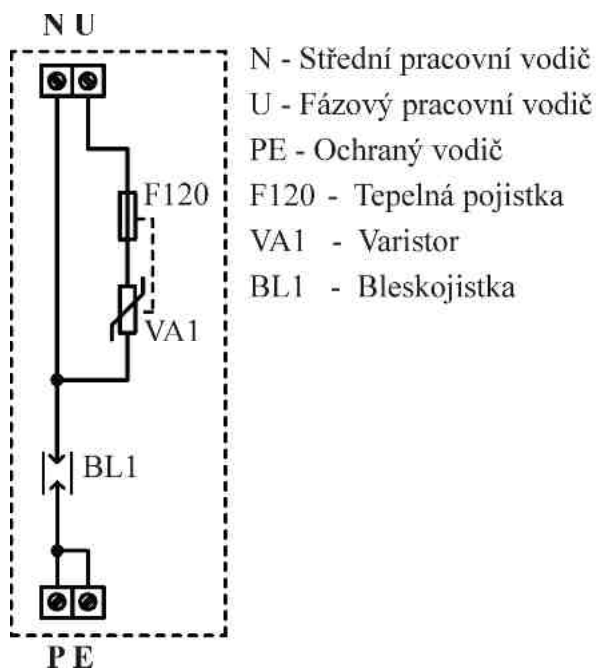


## System TNC



Obr. 40: Doporučené připojení PK 2 [80]

Na následujícím obrázku je zachycena testovaná ochrana PK2 spolu se schématem jejího zapojení.



Obr. 41: Vnitřní zapojení přepěťové ochrany PK 2 spolu s fotografií vnitřku ochrany (Zpracováno z [80] a fotografie autora)

Ochrany tohoto typu se zkouší pomocí kombinovaného generátoru, který generuje přepětí, které se přivádí na vstup přepěťové ochrany. Poté se sleduje rychlost reakce přepěťové ochrany a průběh zbytkového napětí.

Testy této ochrany se provádějí na třech různých úrovních:

a) Zkoušky pro prokazování shody (viz příloha C) s platnými normativními a legislativními předpisy. Tato zkouška je vázána na postup uvedená v kap. 4.2

b) Zkoušky pro sledování charakteristik výrobku pomocí generátoru splňující podmínky pro tvar vlny [98] při podmínkách testu přizpůsobených praktickému zkoušení. Tato forma testu může být rychlejší než a) a je tedy vhodnější pro sledování parametrů průmyslové výroby. Čas měřícího zařízení splňující podmínky [98] je totiž

velmi drahý. To se projevuje zejména u tříd I a II, pro které existuje v Evropě jen několik akreditovaných pracovišť. Pro představu je v příloze B zobrazen unikátní generátor bleskových proudů firmy Hakel s.r.o. Pro měření zpracované v následujících kapitolách byla vybrána právě metodika b).

c) Zkoušky pro sledování ve výrobě. Tyto zkoušky se provádějí dle stejného principu jako b) jenom se používají menší generátory. Tyto generátory nedokáží být tak tvrdé a nesplňují tedy přísné požadávky [98]. Na druhou stranu pomáhají monitorovat kvalitu výrobního procesu a pomáhají zajišťovat parametry, které byly u výrobku prokázány pomocí zkoušek provedených dle a). Testováním přepětových ochranných ve výrobě se ve své disertační práci podrobněji zabýval Ing. Salem Elfard Ph.D. [88].

#### 4.3.1 Metodika měření a měřicí postup

Ochrany třídy III, se zkouší hybridním (kombinovaným) generátorem napětí při chodu naprázdno  $U_{OC}$  1,2/50  $\mu$ s a zkratovém proudu  $I_{SC}$  8/20  $\mu$ s, přičemž je zadáno napětí při chodu naprázdno a tvar proudu je nastaven pomocí zkušební impedance.

Prvním krokem před samotnou zkouškou přepětové ochrany je vždy ověření funkce generátoru. Provádí se zkouška naprázdno a nakrátko, přičemž se sleduje, zda tvar vlny napětěvé resp. proudové vlny odpovídá tvaru požadovanému zkušebním standardem [97]. Zaznamenané průběhy se hodnotí jak kvantitativně, tak kvalitativně. Z kvantitativního hlediska se sleduje amplituda, doba čela, doba půltýlu a celková energie. Z kvalitativního hlediska se hodnotí čistota průběhu a vizuální podobnost vlny předepsanému standardu.

Při tomto kroku dochází a) k základnímu prověření shody se standardem [97] a za b) k ověření přesnosti generování vlny zjištěné pomocí předchozí kalibrace generátoru. Toto měření je velice důležité z hlediska vyjadřování přesnosti zkoušení přepětové ochrany, neboť je třeba kontrolovat nejenom výstupní signál v podobě zbytkového napětí, ale je také důležité mít informace o vstupu v podobě kombinované vlny.

Po ověření funkce a přesnosti generátoru následuje samotná zkouška přepětové ochrany. Postupuje se dle zjednodušeného postupu vycházejícího z postupu popsáno v kap. 4.2. To znamená, že se zaznamená několik průběhů zbytkového napětí pro různá vstupní napětí na různých svorkách. Výstupem měření jsou zaznamenané průběhy, jejich maxima a vypočítané časy čela a půltýlu. Při posuzování shody zkoušené přepětové ochrany se hodnotí odchylky od očekávaného průběhu.

Pro získání požadovaných informací je potřeba vždy generátor vlny, osciloskop s vysokonapětovou sondou a měřicí transformátor proudu. Při praktické zkoušce přepětové ochrany HAKEL PK2 v.č.: 050553 bylo použito následující vybavení:

Použité přístroje:

Generátor RAO RG 550	v.č. 03 (rok výr.1999)
Osciloskop Tektronic TDS 210	v.č.: B 098292
VN sonda (20 kV) 1000/1 Tektronix P 6015A	v.č.: B 042690
Měřicí transformátor proudu 1000/1	ev.č. 9387

Pomocné vybavení:

Přepětová ochrana HAKEL KO-4GN	v.č. 040399
Přepětová ochrana HAKEL DT2/232	v.č. 010013
PC se vstupem pro RS 232	ev.č. 5236
Kabeláž	

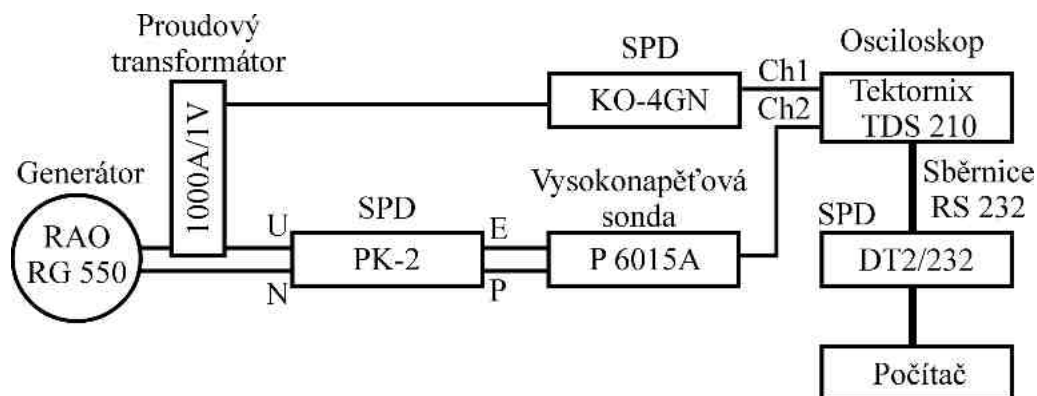


Zkoušený vzorek:

Přepět'ová ochrana HAKEL PK2

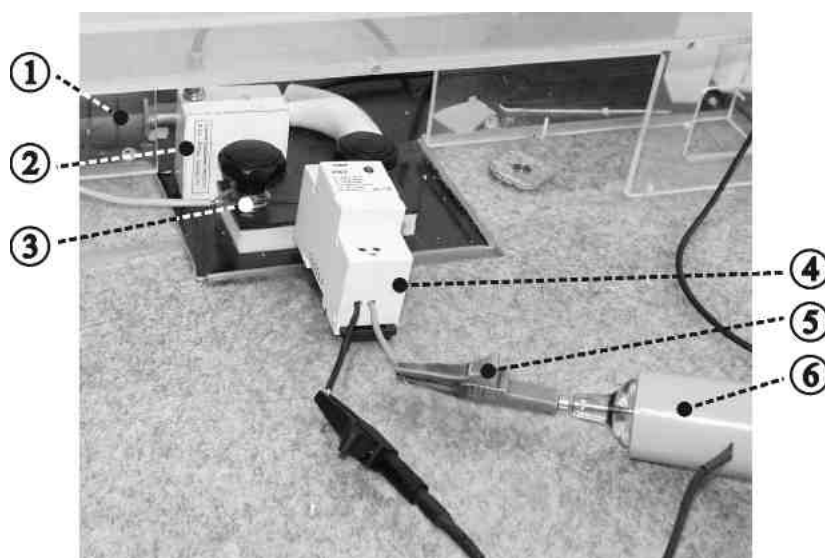
v.č.: 050553

Krom základného měřicího vybavení bylo použito přímého záznamu naměřených hodnot do PC přes datovou sběrnici RS 232. Kvůli ochraně drahých přístrojů byly dále použity dvě doplňkové přepět'ové ochrany, jedna pro vstup osciloskopu pro měření proudu a druhá pro datový vstup do PC. Schématické zapojení přístrojů je zobrazeno na následujícím Obr. 42.



Obr. 42: Schéma zapojení měřicího pracoviště

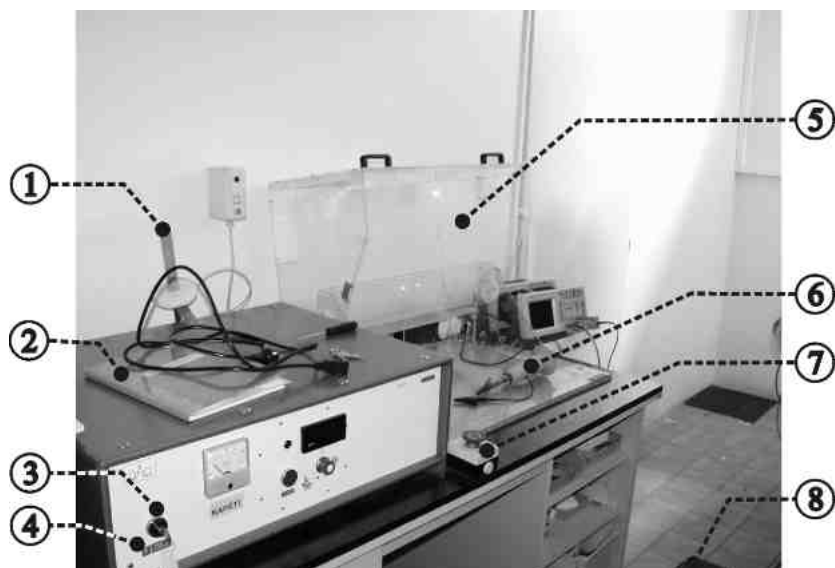
Na schématu je vidět propojení jednotlivých částí měřicího řetězce. Toto uspořádání zůstává stejné po celou dobu měření, jediná flexibilní část je v připojení zkoušené ochrany ke generátoru. Provádí se přepólování, takže na vstupu bude jednou UN a jednou NU. Měření se též provádí mezi svorkami PE a N, na generátor se tedy připojuje jak PEN, tak NPE. Na následujícím Obr. 43 je zachyceno připojení měřeného vzorku k ostatním přístrojům.



Obr. 43: Připojení měřeného vzorku

Na Obr. 43 je vidět 1 – masivní přívod z generátoru, 2 – měřicí transformátor proudu, 3 – šroubovací kontakt pro přichycení vzorku, 4 – měřený vzorek, 5 – krokosvorky pro připojení vysokonapět'ové sondy, 6 – vysokonapět'ová sonda pro měření zbytkového napětí osciloskopem.

Při návrhu zapojení a uspořádání měřicího pracoviště hraje důležitou roli bezpečnost obsluhujícího personálu. Při používaných napěťových a proudových rozsazích může sebemenší chyba znamenat ohrožení života. V první řadě je omezený přístup do laboratoře a na pracoviště mohou jen pověřeni pracovníci. Za druhé je před dveře laboratoře umístěno výstražné světlo, které signalizuje, že probíhá zkouška. Na Obr. 44 je zobrazeno uspořádání měřicího pracoviště s vyznačením základních prvků, zajišťujících ochranu obsluhujícího personálu.



Obr. 44: Měřicí pracoviště a ochranné prvky

Popis jednotlivých prvků:

1. Vysokonapěťová zkoušečka. Před jakoukoli prací se zařízením, je potřeba ověřit, zda na živých částech není napětí
2. Záznamy o provedených měřeních a podrobný popis bezpečnostních procedur
3. Zámek, který je třeba před zahájením měření odemknout. Přístup ke klíči mají jen pověřené osoby.
4. Výstražná tabulka, upozorňující na vysoké napětí na výstupu generátoru
5. Ochranný kryt, který při otevřené poloze zabraňuje spuštění generátoru
6. Zesílená izolace vysokonapěťové sondy
7. STOP tlačítko
8. Izolační podložka pro obslužný personál

Při prováděném měření hrají bezpečnostní procedury důležitou roli a jsou nedílnou součástí postupu měření. Pro měření přepětové ochrany PK2 byl použit následující postup:

1. Kontrola pracoviště: Ověření přítomnosti veškerého přístrojového vybavení, včetně kontroly výrobních čísel. Optická kontrola přístrojů na odchylky od normálního stavu, včetně kontroly přepětových ochran pro osciloskop a datový přenos do PC. Kontrola záznamů o posledních měřeních, zda neobsahují nějaké upozornění.
2. Kontrola funkčnosti HW a SW. To znamená postupné zapnutí osciloskopu, PC, záznamového SW a generátoru.

3. Ověření funkčnosti generátoru v kombinovaném režimu naprázdno a nakrátko. Stanovení napětí naprázdno  $U_{OC}$ , a proudu nakrátko  $I_{SC}$ , společně s příslušnými nejistotami. Kontrola se provádí 1–3 údery nakrátko, následně jedním úderem naprázdno. Výsledky nesmí vybočovat z následujících mezí: pro režim naprázdno  $U_{nab} = 1,6$  kV;  $U_{OC} = (1320 \pm 40)$  V;  $T_1 = (1,2 \pm 0,36)$   $\mu$ s;  $T_2 = (50 \pm 10)$   $\mu$ s a pro kombinovaný režim nakrátko  $U_{nab} = 10$  kV;  $I_{SC} = (5100 \pm 500)$  A;  $T_1 = (8 \pm 0,8)$   $\mu$ s;  $T_2 = (20 \pm 2)$   $\mu$ s. Tolerance jsou uvedené dle interní specifikace firmy Hakel s.r.o. [86]. Tyto toleranční hodnoty odpovídají požadavkům nejnovější verze normy IEC 61643-1 [83].
4. Odpojení generátoru a zapojení sledovaného vzorku. Provedení opakovaného měření ochranné úrovně nebo-li zbytkového napětí  $U_p$ , pro násobky proudu  $I_p$ , stanoveného výrobcem na 5 kA, pro zapojení vstupních svorek N-U, U-N, N-PE, PE-N.
5. Záznam naměřených hodnot do elektronického úložiště, s jednoznačným označením, které identifikuje, jak dobu, tak zkoušený vzorek.
6. Zpracování naměřených hodnot, posouzení shody s normou [82], vypracování protokolu o měření.

#### 4.3.2 Analýza zdrojů nejistot

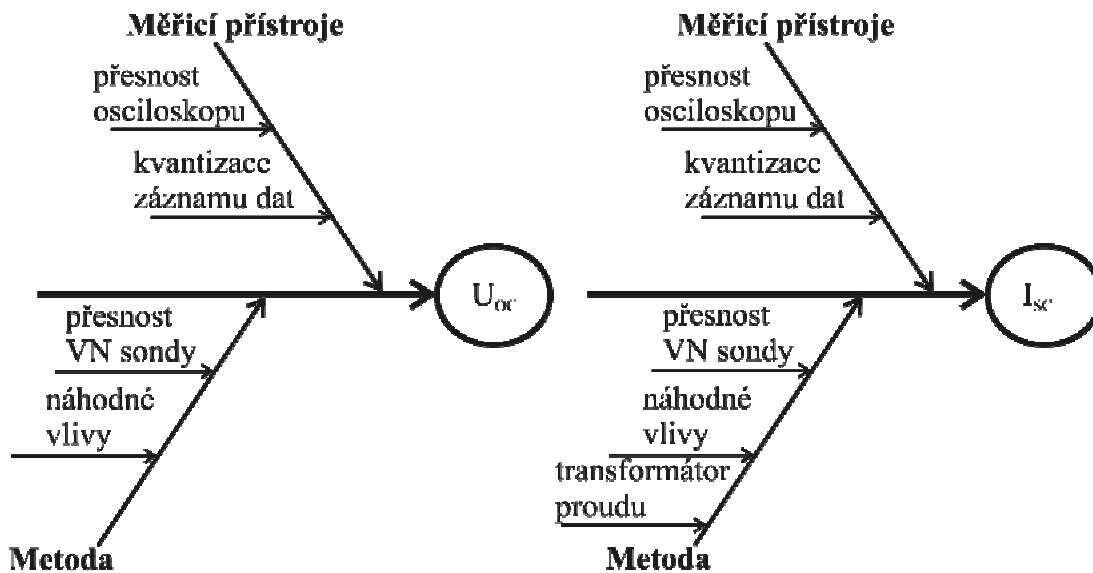
Při analýze podílejících se nejistot je nejlepší jít krok po kroku po měřicím řetězci. Jako prvotní budící prvek je zapojen hybridní generátor. Jeho úkolem je generovat přepětí, které splňuje požadavky normy [82]. Generovaný signál má mít průběh dle Obr 39. Je jasné, že reálný průběh se od ideálního bude vždy odlišovat, takže pokaždé dostaneme vlnu s trochu jinou amplitudou a jinými charakteristickými časy  $T_1$  a  $T_2$ . Kontrola zahrnutá do měřicího postupu zaručuje, že charakteristiky generátoru nevybočí z mezí požadovaných normou. Přesto toto holé posouzení shody nestačí a musíme mít pečlivě vyjádřenu nejistotu pro proud, napětí i  $T_1$  a  $T_2$ . Impuls z generátoru totiž budí reakci v přepětěvé ochraně, kterou ve finále posuzujeme a má na ni přímý vliv, proto se nejistota generované vlny přímo promítá do výsledku měření. Další prvkem měřicího řetězce je měřicí proudový transformátor, který slouží k proudu na napětí, které dále zaznamenáváme osciloskopem. Při tomto měření se také může projevit útlum způsobený přepětěvou ochranou chránící signálový vstup osciloskopu. Při měření zbytkového napětí se používá vysokonapětěvá sonda, která pracuje na principu děliče a do měření vnáší další nepřesnost. Dále se uplatní chyba osciloskopu, který hodnoty zaznamenává, a to jak v oblasti naměřených hodnot, tak v oblasti časové základny. Naměřené hodnoty se převádějí na úroveň rozlišitelnosti, se kterou pracuje osciloskop při zobrazování/ukládání. Další nejistota vstupuje do hry spolu se zpracování hodnot výpočetní technikou a určitou mírou nejistoty vnáší do celkového výsledku dokonce samotný proces výpočtu nejistoty. Krom toho se mohou uplatňovat nejistoty způsobené vodiči, kontakty, změnami prostředí. Pakliže shrneme tyto identifikované zdroje, obdržíme následující souhrn:

- generátor
- transformátor
- vysokonapětěvá sonda
- přepětěvá ochrana na signálové cestě
- osciloskop

- záznam hodnot
- výpočet
- vodiče, kontakty, teplota, atd.

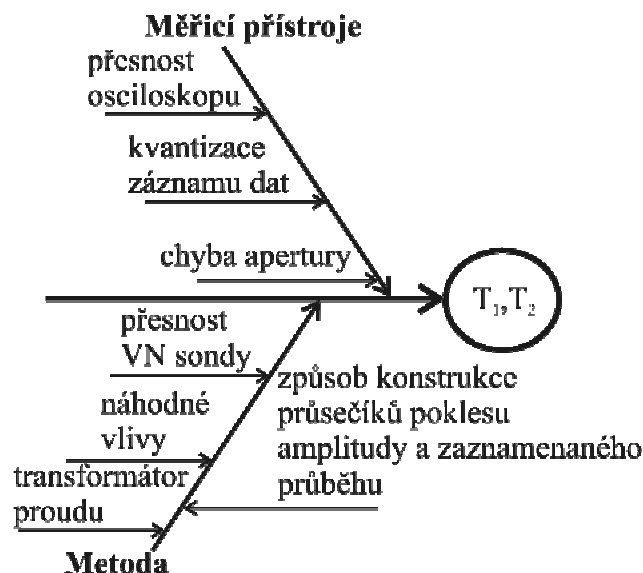
Samozřejmě vždy záleží na tom, jakou veličinu vyjadřujeme. Pokud to bude čas, tak nás bude především zajímat přesný průběh generovaného impulsu a krom nejistot při měření úrovně napětí, které budou zásadní, nás bude také zajímat chyba apertury osciloskopu. Přesné časy  $T_1$  a  $T_2$  nás zajímají ale v podstatě jen u kontroly generátoru. Při zkoušení přepětové ochrany samotné nás zajímá zejména ochranná úroveň napětí, tedy maximální zaznamenaná hodnota, přičemž časové hledisko již nehraje takovou roli. Pro přesnou lokalizaci maxima je sice podrobné zkoumání časového průběhu potřeba, ale pro zkušební účely je toto vyčíslování nejistoty zbytečné, protože vzhledem k naměřené hodnotě jsou nejistoty související s měřením času zanedbatelné. Z tohoto důvodu musíme rozdělit vyčíslování nejistoty pro čas a napětí, i když spolu navzájem souvisí a jedno bez druhého nejde vyjádřit.

Na následujících Obr. 45 a Obr. 46 jsou znázorněny Ishikawa diagramy pro stanovení zdrojů nejistoty  $U_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $T_1$  a  $T_2$  při ověřování správné funkce generátoru.



Obr. 45: Ishikawa diagram pro měření maximálního napětí a proudu při ověřování charakteristik kombinovaného generátoru

Zdroje nejistot zobrazené na Obr. 45 jsou z principu stejné i pro výpočet nejistoty ochranné úrovně  $U_p$  přepětové ochrany.



Obr. 46: Ishikawa diagram pro měření doby čela a týlu impulsu při ověřování charakteristik kombinovaného generátoru

Z uvedeného rozboru vyplývá, že největší komplikace vznikají při výpočtu doby čela a týlu vlny. U úrovně ochrany je problém jednodušší, protože mezi nejistoty, které se na výsledku výrazně projevují, patří jen nejistota maxima generátoru, nejistota vysokonapěťové sondy, nepřesnost osciloskopu a chyba kvantizace související se záznamem dat. V podstatě jediným komplikovanějším výpočtem u zbytkového napětí je maximum generátoru, u kterého je nejistota kombinací zmiňovaných vlivů. Pokud bychom rozdělili vyčíslované nejistoty na nejistoty typu A a typu B, zjistili bychom, že nejistota typu B jasně převažuje a s výpočtem nejistoty typu A se prakticky nesetkáme. Je tomu tak proto, že nelze měření na jednotlivých napěťových úrovních vícekrát opakovat, protože by to znamenalo nepřijatelnou zátěž měřené ochrany a také kvůli časové náročnosti. Zkušební čas laboratoře zkoušení přepětových ochrany je velice drahý, a proto se s opakovaným měřením setkáme jen u výpočtu proudu generátoru nakrátko, kdy jsou doporučeny až 3 údery. Obecně se u zkoušení přepětových ochrany postupuje tak, že se nejistota typu A související s různými proměnlivými vlivy stanoví jen jednou pro celou metodiku. To znamená jednu větší sérii opakovaných měření na generátoru a na měřeném vzorku, ze kterých se spočítají příslušné rozptyly, které se pak používají v dalších výpočtech, aniž by běžná měření opakovala. Nese to sebou ale jedno úskalí. V běžném odhadu měřené veličiny z více měření se používá interval vymezený rozptylem a střední hodnotou. Pokud neměříme opakovaně, nemůžeme interval vymezit rozptylem a naměřenou hodnotou, protože ta může být od střední hodnoty vzdálena. O kolik se může lišit, to je věc rozptylu, proto musíme vlastně uvažovaný rozptyl metodiky zahrnout do výpočtu dvakrát, protože jde o určování nejistoty typu A z více hodnot.

U vyjadřování času komplikuje celou věc zejména odečítání ze zaznamenaného průběhu. Sledujeme rozdíl mezi dvěma body v průběhu funkce, která závisí jak na napětí, tak na čase. Nesnadné odečítání plyne z toho, že zaznamenané průběhy nebývají kvůli vysoké kvantizaci příliš hladké a také se začíná projevovat nejistota náhodných vlivů, která způsobuje další zuby. Poté závisí určení doby čela a týlu vlny zejména na způsobu vyhlazení zaznamenaného průběhu. Požadované časy se určují podle poklesů z maximální hodnoty napětí. Vzhledem k tomu, že toto maximum má již svoji nejistotu, tak v kombinaci se zubatým průběhem zaznamenané vlny, dostáváme relativně široký

interval, ve kterém se může požadovaný čas nalézat, to znamená relativně vyšší nejistotu určování doby čela a týlu vlny. Exaktně vyjádřit tuto nejistotu je poněkud složitější, ale není to nemožné. Viz následující kap. 4.3.3.

### 4.3.3 Výpočet nejistoty

#### 4.3.3.1 Nejistota měření při kontrole parametrů generátoru

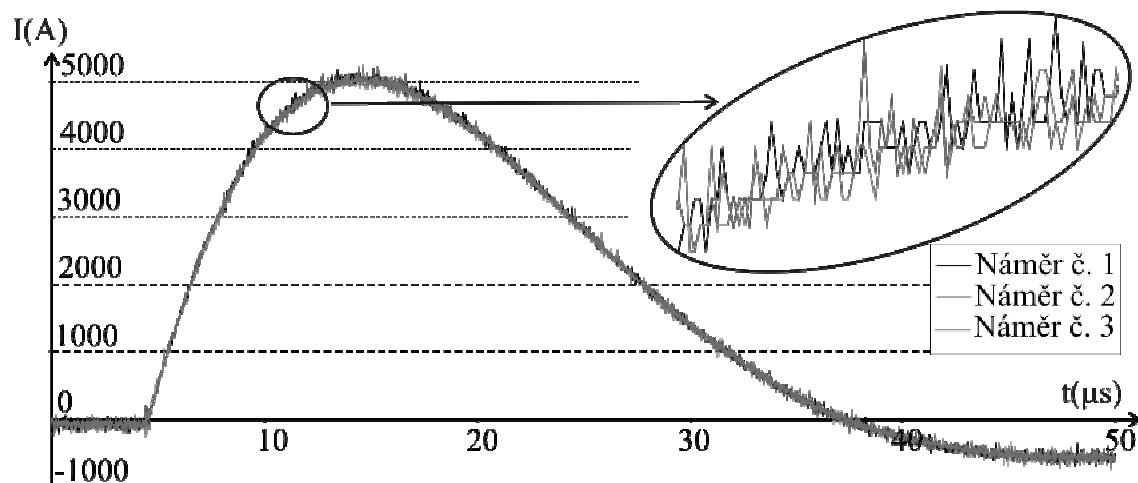
Z kap. 4.3.2 vyplývá, že výslednou nejistotu  $I_{SC}$  má vliv zejména přesnost osciloskopu, přesnost vysokonapěťové sondu, přesnost měřicího transformátoru proudu, kvantizace dat a náhodné vlivy.

Nejjednodušeji se stanoví vliv kvantizace. Ten závisí na počtu kvantizačních úrovních a zvoleném rozsahu. Použitý osciloskop zaznamenává každý kanál pomocí 8 bitů. Pološíře pro výpočet nejistoty tvoří polovinu z jednoho kvantizačního kroku. Například v případě měření při nabíjecím napětí 10 kV byla úroveň rozlišení záznamu 20 A, pološíře  $a$  tedy bude 10 A. Protože se hodnoty mění mezi úrovněmi diskrétně, musíme pro výpočet nejistoty typu B použít rovnoměrné rozložení pravděpodobnosti:

$$u_{kvant.} = \sqrt{\frac{a^2}{3}}. \quad (4.1)$$

Například pro nabíjecí napětí 10 kV vyšlo  $u(I_{SC})_{kvant.} = 11,55$  A.

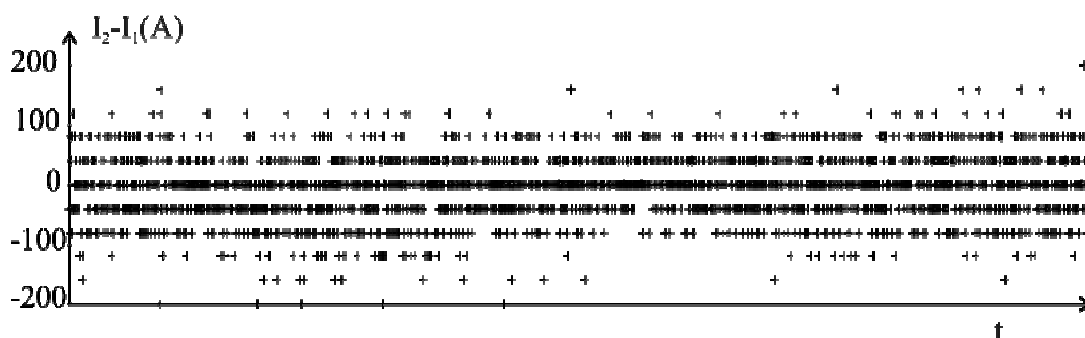
Výpočet náhodného vlivu již je poněkud složitější. Na následujícím Obr. 47 jsou naráz znázorněny průběhy všech tří opakovaných měření při nabíjecím napětí 10 kV.



Obr. 47: Znázornění průběhu proudu při kombinovaném režimu nakrátko a nabíjecím napětí 10 kV

Z obrázku vyplývá fakt, že všechny tři průběhy se překrývají. Náhodný faktor tudíž nebude tak významný. Při přiblížení (viz detail Obr. 47) je vidět, že mezi jednotlivými průběhy jsou přece jen rozdíly, které jsou do velké míry způsobeny vlivem kvantizace.

Protože měření jsou navzájem časově synchronizována, tak lze v každém okamžiku posuzovat rozptyl a tedy i nejistotu typu A. Před dalším zpracováním je dobré ověřit, zda mezi náměry opravdu není žádný systematický posun. Pro ilustraci poslouží rozdíl mezi prvním a druhým měřením. Absolutní rozdíly jsou znázorněny v následujícím Obr. 48.



Obr. 48: Znárodnění rozdílů dvou průběhů v závislosti na čase

Z grafu je vidět, že hodnoty jsou rozloženy symetricky kolem nuly a situace je podobná na začátku, uprostřed i na konci průběhu. To nám dává příležitost k statistické analýze nejistoty.

Prvním krokem je výpočet dílčích nejistot v každém čase. Počet těchto nejistot bude stejný jako počet naměřených vzorků. V našem případě tedy 2500. Protože máme jen tři průběhy, tak se dá nejistota v každém zaznamenaném čas spočítat z jednoduchého vztahu:

$$u_A(I_{SC}, t) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{SC,t,i} - \bar{I}_{SC,t})^2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (I_{SC,t,1} - \bar{I}_{SC,t})^2 + (I_{SC,t,2} - \bar{I}_{SC,t})^2 + (I_{SC,t,2} - \bar{I}_{SC,t})^2 \right]} \quad (4.2)$$

Z takto formulovaného vztahu získáme 2500 dílčích nejistot. Jejich zprůměrnováním dostaneme standardní nejistotu 17,31 A. Musíme si ale uvědomit, že tato nejistota:

a) je složená ze dvou složek, přičemž jedna je tvořena kvantizací a druhá náhodnými vlivy. Je důležité nezapočítat vliv kvantizace dvakrát, proto dále nesmíme počítat s nejistotou  $u_{kvant.}$ , vypočítanou dle vztahu (4.1)

b) sama má určitou nejistotu, protože 2500 dílčích nejistot mělo určitý rozptyl. Tato nejistota nejistoty se spočítá jednoduše dle standardního vztahu pro nejistotu typu A (2.26). V našem případě vychází tato nejistota 0,22 A. Tato hodnota je vzhledem k amplitudě zanedbatelná, ve výpočtech ji ale uplatníme z demonstračních důvodů.

Máme tedy dvě základní nejistoty:

$$u(I_{SC})_{(kvant.+náhod.)} = 17,31 \text{ A}$$

$$u[u(I_{SC})_{(kvant.+náhod.)}] = 0,22 \text{ A}$$

Zbývá pouze dopočítat nejistotu způsobenou přesností osciloskopu, vysokonapěťové sondy a měřícího transformátoru proudu. Všechny tyto nejistoty jsou typu B. V případě laboratoře firmy Hakel s.r.o. jsou všechny tyto nejistoty dostupné ve formě standardních kombinovaných nejistot ověřených kalibrací. Nejistoty jsou vyjádřeny v procentech. Pro přepočítání na absolutní hodnoty stačí použít průměrnou naměřenou hodnotu amplitudy  $I_{SC}$ . Pro výpočet v případě nabíjecího napětí 10 kV pak vyjde:

$$u_{osciloskop} = 1,4 \% z \quad \bar{I}_{SC} = 5146,67 * 0,014 = 72,05 A$$

$$u_{sondy} = 0,6 \% z \quad \bar{I}_{SC} = 5146,67 * 0,006 = 30,88 A$$

$$u_{transformátor} = 3,2 \% z \quad \bar{I}_{SC} = 5146,67 * 0,032 = 164,69 A$$

Výsledná kombinovaná nejistota se pak vypočítá sloučením všech dopsud vypočítaných nejistot dle vztahu:

$$u(I_{SC}) = \sqrt{u_{transformátor}^2 + u_{osciloskop}^2 + u_{sonda}^2 + u_{kvant.+náhodná}^2 + u(u_{kvant.+náhodná})^2} \quad (4.3)$$

V našem konkrétním případě to bude

$$u(I_{SC}) = \sqrt{164,69^2 + 72,05^2 + 30,88^2 + 17,31^2 + 0,22^2} = 187,72 A$$

V našem případě je kombinovaná nejistota tvořena převážně nejistotami typu B. Tyto nejistoty vyplývají z dokumentace podložené kalibračními měřeními. Proto můžeme uvažovat velmi vysoké stupně volnosti a volit koeficient krytí  $k = 2$  pro konfidenční úroveň 95 % (Viz kap. 3.1.6.2).

V našem případě bude tedy platit:

$$U_{95}(I_{SC}) = 2 \cdot u(I_{SC}) = 2 \cdot 187,72 = 375,44 A$$

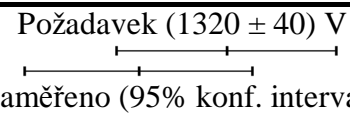
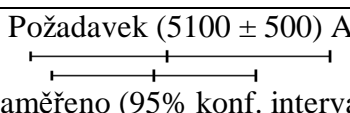
Celkový výsledek tedy je:

$$I_{SC} = 5146,67 A \text{ s rozšířenou nejistotou } U_{95}(I_{SC}) = 375,44 A$$

Tento výsledek **splňuje** požadavek na  $I_{SC}$  ( $5100 \pm 500$ ) A

Hodnoty  $U_{OC}$  se vypočítají analogicky s tím rozdílem, že se při výpočtu neuplatní nejistota měřicího transformátoru proudu. V následující tabulce je přehled vypočítaných amplitud a porovnání s požadavky.

Tab. 4.2: Porovnání amplitud kombinované vlny s předepsanými požadavky

$U_{nab}$	Veličina	Hodnota	$U_{95}$	Shoda	Porovnání
1,6 kV	$U_{OC}$ (V)	1352,00	41,60	Ano přímým porovnáním měřené hodnoty. Pomocí rozšířené nejistoty <b>nelze</b> plnou shodu prohlásit	Požadavek ( $1320 \pm 40$ ) V  naměřeno (95% konf. interval)
10 kV	$I_{SC}$ (A)	5146,67	375,44	Ano	Požadavek ( $5100 \pm 500$ ) A  naměřeno (95% konf. interval)

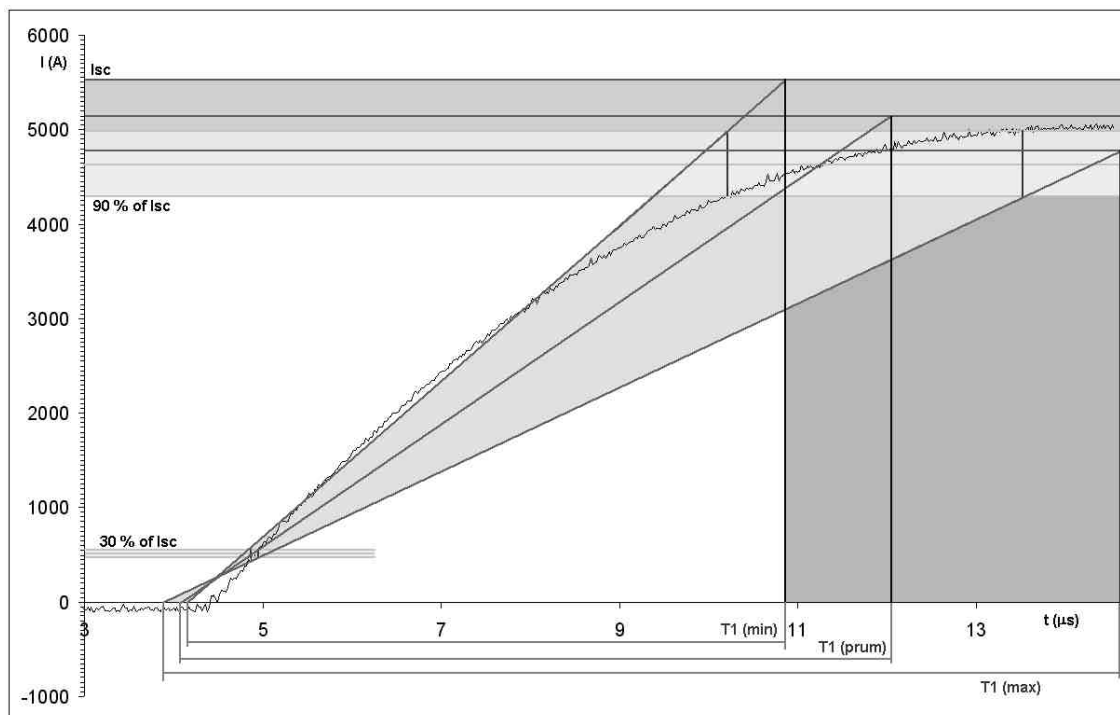
Z tabulky vyplývá, že v případě kombinovaného režimu nakrátko nelze prohlásit plnou shodu s požadavky. Při daném měřícím vybavení, zejména přesnosti měřicího osciloskopu nelze na 95 % konfidenční úrovni generátor se specifikací srovnávat. Nicméně generátor vyhověl kalibraci ČMI a tak není důvod se domnívat, že nesplňuje kladené nároky. Výše zmíněné měření včetně vyjádřené nejistoty není důvodem k žádným odůvodněným pochybnostem, neboť shoda nebyla vyvrácena. Naopak, shoda je pravděpodobnější než neshoda. I když má měření poměrně velkou nejistotu, lze jím funkčnost generátoru dle interního dokumentu laboratoře [86] prověřovat.

Při určování dob  $T_1$  a  $T_2$  se v praxi užívá grafického řešení. Pracovník laboratoře vyznačí v grafu průběhu proudu vodorovnými čarami 100%, 90 %, 50 % a 10 %



amplitudy (resp. v grafu průběhu napětí 100 %, 90 %, 50 %, 30 % amplitudy) a spojením průniků ve smyslu Obr. 39 odečte časy  $T_1$  a  $T_2$  přímo z grafu.

Na základě teoretického rozboru nic nebrání výpočtu nejistoty, ale je praktické ji také odečítat rovnou z grafu. Lze toho dosáhnout, pokud zobrazíme v grafu i intervaly udané rozšířenou nejistotou. Následující obrázek ukazuje příklad pro stanovení času  $T_1$  při nabíjecím napětí 10 kV a kombinovaným režimem nakrátko.



Obr. 49: Grafické řešení stanovení času  $T_1$  včetně zahrnutí vlivu nejistoty měření (zobrazený průběh je průměrem všech třech provedených měření)

Z grafu je vidět, že hodnota  $T_1$  určená klasickým způsobem z grafu vychází  $7,97 \mu\text{s}$ , což jsou pouhých  $30 \text{ ns}$ . Při uvažování vlivu nejistot již situace není tak příznivá, při konfidenční hladině 95 % můžeme času  $T_1$  přiřadit interval  $6,7 - 10,74 \mu\text{s}$ . Vzhledem k tomu, že požadovaný interval je  $7,2 - 8,8 \mu\text{s}$ , tak nemůžeme prohlásit na takto vysoké konfidenční hladině shodu.

Situace je obdobná jako u výše uvedeného prokazování shody napětí. Výpočet ukazuje na velice pravděpodobnou shodu, ale na hladině pravděpodobnosti 95 % ji nejsme schopni prokázat. K tomu bychom potřebovali znát přesněji velikost amplitudy. Čelo vlny vykazuje ukázkový průběh, na kterém nelze prakticky nic vylepšovat, takže je vidět, že problém není na straně generátoru, ale na straně jeho ověřování. I když o problému v pravém slova smyslu nemůžeme hovořit, protože čelo vlny vyhovělo ve smyslu interního předpisu [86] i ve smyslu mezinárodní normy [83]. Výpočet nejistoty pouze ilustruje, jak se jednotlivé prvky měřícího řetězce podílejí na nejistotě výsledku a tím nabízí cestu, kterou se můžeme v budoucnu vydat, pokud [83] začne vyžadovat posuzování shody na určité konfidenční hladině.

Časy  $T_1$  a  $T_2$  u proudového i napěťového průběhu již není na tomto místě potřeba dále analyzovat, protože nevstupují do dalšího výpočtu. U průběhu nakrátko i naprázdno doba čela i doba týlu vyhověla předepsaným požadavkům.

Vstupní nejistotou, která nebyla v analýze výše zmíněna a přitom figuruje mezi zdroji popsanými v kap. 4.3.2, je nejistota apertury. U digitálního osciloskopu totiž kromě odečteného napětí musíme počítat s nepřesností časové základny. To se projeví při velice rychlých dějích, jako je například průběh napětí při kombinovaném režimu naprázdno. Na Obr. 55 v příloze E je vidět, jak rychlý napětový průběh může být. Oblast vrcholu se vešla do 0,1  $\mu$ s. Použitý osciloskop má velice stabilní časovou základnu. Tento fakt byl prokázán kalibračním protokolem 113-KL-5806-03 ČMI. Ve všech rychlostech vzorování osciloskop neprojevil žádnou odchylku. Nejistota kalibrace byla 0,4 %. V případě našeho měření se tak nejistota pohybuje v řádu maximálně desítek nanosekund. Takto malou nejistotu lze zanedbat. Přesto nám tento údaj může napomoci v chápání výsledku měření. Ve výše zmíněném výpočtu průměrné hodnoty  $T_1$  proudového průběhu vyšla hodnota 7,97  $\mu$ s a uvedli jsme, že odchylka od požadované hodnoty byla pouze 30 ns. Údaj 30 ns ale nemá v tomto případě z metrologického hlediska žádnou hodnotu. Je to pouze náhodné číslo, které vyšlo. I když vezmeme v úvahu nejmenší z nejistot, tedy nejistotu apertury, tak se uvedená odchylka může změnit až o 100 %. Z toho plyne, že bychom se měli vyvarovat argumentaci čísly, které nemají žádnou váhu. Jakmile začneme mluvit o úrovni confidence, zjistíme, že na tato čísla se nemůžeme vůbec spolehnout.

Posledním úkonem při ověřování funkce generátoru je vizuální posouzení tvaru vlny. Ta nesmí jevit žádné signifikantní odchylky. Toto posuzování provádí vždy kvalifikovaný pracovník. V našem případě posoudil naměřené průběhy vedoucí laboratoře Ing. Reisinger a neshledal žádnou odchylku od normálu. V budoucnosti by se mohly pro posuzování průběhu používat i počítače. Jediná překážka spočívá v jednoznačném definování OK a NOK stavu.

#### *4.3.3.2 Nejistota měření zkoušení přepětové ochrany*

Při vyjadřování nejistoty ochranné úrovně  $U_p$  postupujeme stejným způsobem, jakým jsme postupovali v předchozí kapitole u výpočtu nejistoty amplitudy. Nejprve je potřeba vyjádřit náhodnou složku nejistoty společně se složkou kvantizace, dále vyjádříme nejistotou osciloskopu a napětové sondy.

Problém může nastat s tím, že měření neopakujeme, respektive měřený objekt může měnit své charakteristiky při opakovaném měření, a tudíž je obtížné odhadnout náhodnou složku nejistoty. V tomto případě nám může napomoci předchozí analýza generátoru. V případě proudového i napětového průběhu tvořila výsledná nejistota náhodné složky a kvantizační složka zhruba dvojnásobek nejistoty kvantizační složky samotné. Takto postavená úvaha se může zdát zjednodušující, ale z provedeného měření víme, že v této aplikaci se blíží realitě. Přístup odhadu náhodné složky na základě zkušeností je lepší, než její zanedbání.

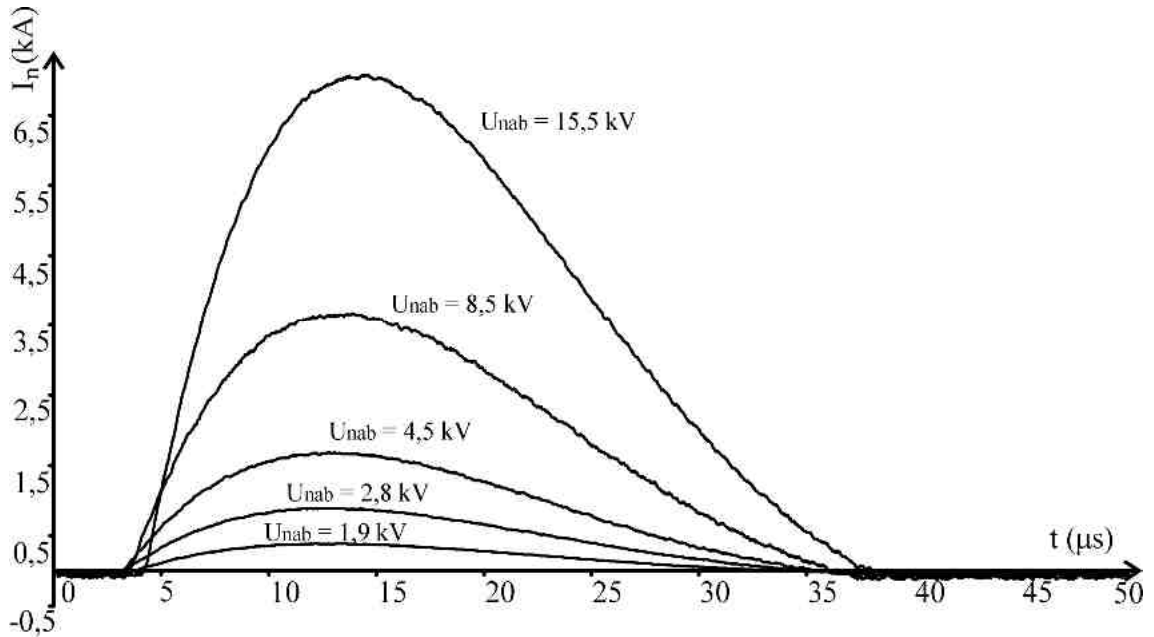
#### *4.3.4 Naměřená data a výsledky*

Dle navrženého postupu měření bylo naměřeno 40 průběhů proudu a napětí při různém svorkovém zapojení měřené ochrany, dále byly naměřeny dva další kontrolní průběhy, pro ověření variability měření. Pro ověření funkce generátoru bylo naměřeno devět průběhů – vždy po třech pro každý ze tří režimů. Použitý osciloskop umožňuje navzorkovat 2500 měřicích bodů pro každý průběh. Celkem tedy bylo třeba zpracovat 51 průběhů, tedy 127 500 naměřených hodnot.

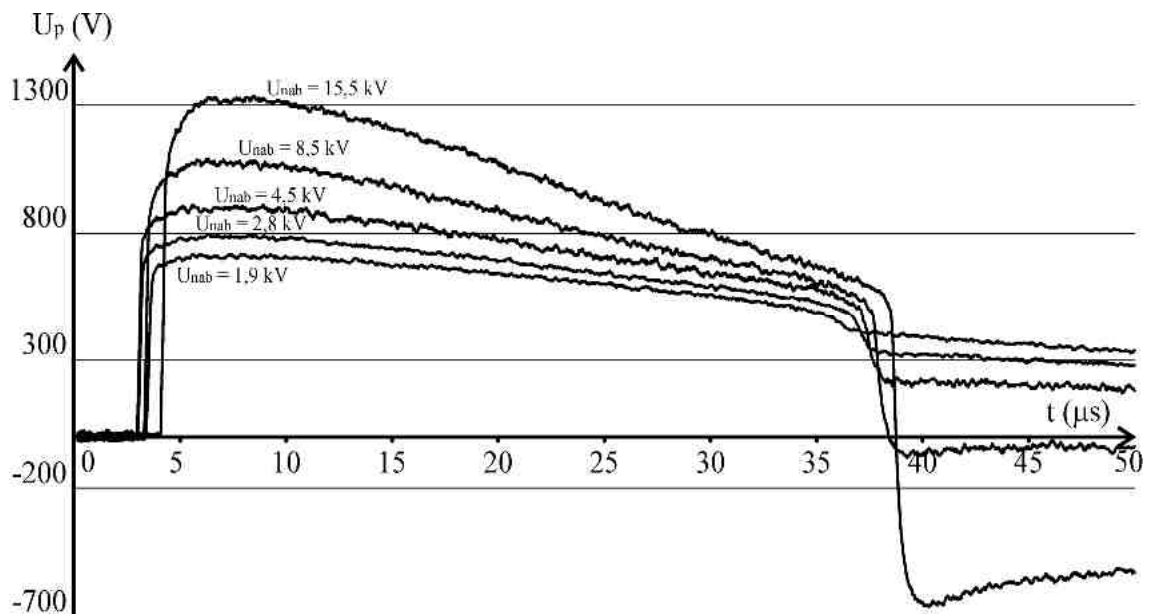
Pro velké množství hodnot a grafů není možné v textu či v papírové příloze této práce uvést kompletní přehled naměřených a zpracovaných hodnot. Tato data jsou

součástí elektronické přílohy G. Pro náhled je v příloze E zachycena alespoň část hodnot pro dva průběhy ( $U_{nab} = 2,4$  kV, zapojení PE-N a N-PE).

Na následujících dvou Obr. 50 a 51, jsou pro představu zachyceny průběhy proudu a napětí při svorkovém zapojení N-U. Pro lepší přehlednost nejsou zobrazeny přímo naměřené hodnoty, ale jejich klouzavý průměr. Použitý interval hodnot klouzavého průměru byl zvolen 10. Naměřená data se totiž jeví kvůli kvantizaci a náhodným vlivem jako jemně oscilovaná a při jejich přímém zobrazení by byl graf hůře čitelný, viz grafy naměřených hodnot v příloze E.



Obr. 50: Průběh proudu při zapojení svorek U-N a při nabíjecích napětích 15,5; 8,5; 4,5; 2,8; 1,9 kV.



Obr. 51: Průběh zbytkového napětí při nabíjecích napětích 15,5; 8,5; 4,5; 2,8; 1,9 kV a zapojení svorek U-N.

Průběhy proudu na Obr. 50 vypadají přesně podle očekávání, typický tvar vlny není narušen žádnou větší odchylkou. Největší zaznamenaný proud je 7,36 kA (maximální zatížitelnost ochrany PK-2 je v zapojení U-N 8 kA), ani tento průběh nejeví žádné anomálie a testovaná ochrana úder přestála bez poškození funkčnosti a jakýchkoliv známek průrazu nebo přeskočení. Na Obr. 51. je vidět průběh napětí, přičemž ochranná úroveň je rovna maximu tohoto zbytkového napětí. Ani v případě nejvyššího nabíjecího napětí 15,5 kV nepřekročila špičková hodnota napětí hodnotu 1,4 kV. Jediný problém, který se při nejvyšším použitém nabíjecím napětí objevil, byl překmit do záporných hodnot po svedení úderu. Záporná hodnota dosáhla -680 V. Tato hodnota ale není znakem nějaké závady zkoušené ochrany, ale vyplývá z charakteristik generované vlny, viz průběh na Obr. 47 v kap 4.3.3.1.

Nejistoty ochranné úrovně byly vypočítány dle postupu uvedeném v kap. 4.3.3. Na výsledné nejistotě se podílí hlavně nejistota osciloskopu, druhou nejdůležitější složkou byla nejistota kvantizace a nejistota náhodných vlivů. Poslední nejistotou, která měla vliv, byla nejistota vysokonapěťové sondy.

V následující Tab 4.3 jsou přehledně vyjádřena odečtená maxima, tedy  $I_n$  a  $U_p$  pro všechny  $U_{nab}$  a všechny způsoby připojení testovaného vzorku.

Tab. 4.3: Výsledky měření zbytkového napětí přepětové ochrany PK-2 vč. 050553

zap.	$U_{nab}$ (kV)	$I_n$ (kA)	$U_p$ (V)	kvant. (v)	$U_{95}(U_p)$ (V)	$U_{95}(U_p)/$ $U_p$ (%)	zap.	$U_{nab}$ (kV)	$I_n$ (kA)	$U_p$ (V)	kvant. (V)	$U_{95}(U_p)$ (V)	$U_{95}(U_p)/$ $U_p$ (%)
UN	1,9	0,39	<b>760</b>	20	<b>32,70</b>	4,30	NU	1,9	0,46	<b>780</b>	20	<b>33,14</b>	4,25
UN	2,8	0,92	<b>840</b>	20	<b>34,47</b>	4,10	NU	2,8	0,98	<b>860</b>	20	<b>34,92</b>	4,06
UN	4,5	1,76	<b>1000</b>	40	<b>55,33</b>	5,53	NU	4,8	1,96	<b>940</b>	20	<b>36,79</b>	3,91
UN	8,5	3,76	<b>1200</b>	40	<b>58,90</b>	4,91	NU	9,0	4,00	<b>1200</b>	40	<b>58,90</b>	4,91
UN	15,5	7,36	<b>1440</b>	80	<b>102,26</b>	7,10	NU	15,5	7,20	<b>1400</b>	40	<b>62,87</b>	4,49
PEN	1,6	0,66	<b>840</b>	20	<b>34,47</b>	4,10	NPE	1,6	0,66	<b>860</b>	20	<b>34,92</b>	4,06
PEN	2,4	1,06	<b>880</b>	20	<b>35,38</b>	4,02	NPE	2,4	1,06	<b>1040</b>	20	<b>39,21</b>	3,77
PEN	5,0	2,48	<b>960</b>	40	<b>54,67</b>	5,69	NPE	4,9	2,44	<b>1120</b>	40	<b>57,42</b>	5,13
PEN	10,0	5,04	<b>960</b>	40	<b>54,67</b>	5,69	NPE	10,0	4,96	<b>1120</b>	40	<b>57,42</b>	5,13
PEN	19,0	9,40	<b>1040</b>	40	<b>56,01</b>	5,39	NPE	18,5	9,20	<b>1080</b>	40	<b>56,71</b>	5,25

V tabulce uvedené výsledky odpovídají ochranné úrovni SPD PK2, při různých nabíjecích napětích, přičemž je uvedena i rozšířená nejistota na konfidenční úrovni 95 %. Pro stanovení nejistoty byl použit koeficient krytí  $k = 2$ . Ochrana byla testována napětími vyššími, než je požadováno. V zapojení PEN, NPE poskytla ochrana PK2 deklarovanou úroveň  $U_p$  i při těchto zvýšených napětí a to i včetně rozšířené nejistoty.

#### 4.4 Zhodnocení výsledků a doporučení dalšího vývoje měření přepětových ochran

Provedené měření prověřilo použitý generátor kombinované vlny a zkoušenou přepětovou ochranu PK2. Jak generátor, tak ochrana vyhověli předepsaným požadavkům.

V případě generátoru se ukázalo, že jeho ověření na vysoké konfidenční hladině je možné pouze kalibračním měření. Kontrolní měření nedokáže prokázat plnou shodu s předepsaným tolerančním intervalem z důvodu vyšší rozšířené nejistoty měření. Analýza postupu výpočtu doby čela a tílu vlny naznačila možnost automatizovaného vyhodnocování. Vzhledem k tomu, že všechna data jsou v počítači, tak je neefektivní

ověřovat dobu čela a týlu vlny ručně. Z toho plyne doporučení pro softwarovou kontrolu správných parametrů kombinované vlny nakrátko a naprázdno.

Měření a vyhodnocování přepětíové ochrany PK2 proběhlo dle teoretických předpokladů. Výpočet nejistoty měření byl v souladu s poznatky disertační práce. Zpracovávání velkého počtu naměřených hodnot bylo zdlouhavé, protože bylo nutno data nejdříve převést z formátu DSO a pak je dále zpracovat včetně dopočítání nejistoty měření pro jednotlivé průběhy. V tomto případě je opět vhodné v budoucnu tyto kroky zautomatizovat. Je neefektivní v jednom programu hodnotu zaznamenávat, v jiném zobrazovat, v další zpracovávat a nakonec vyhotovovat protokol v textovém editoru. V ideálním případě by měl být vytvořen software, který vyhotoví protokol automaticky přímo ze zaznamenaných hodnot formátu \*.dso a zadaných parametrů měření.

Dokumentace zkoušek a vyjadřování nejistoty měření byla v laboratoři firmy Hakel s.r.o. na vysoké úrovni a v souladu se všemi požadavky na akreditovanou laboratoř.

Výše doporučené zautomatizování vyhodnocování zkoušek může napomoci zrychlení procesu zkoušek a může eliminovat některé lidské chyby při výpočtu. Neznamená to ovšem, že celé vyhodnocování může probíhat automaticky. Kvalifikovaný personál je vždy potřeba, aby rozpoznal nestandardní situace.

## 5 ZÁVĚR

Cílem této disertační práce byla analýza moderních metodik vyjadřování a zajišťování přesnosti elektrotechnických měření spolu s návrhem řešení vybraných úskalí těchto metodik. Detailní analýza dostupných materiálů ukázala, jak je problematika vyjadřování a zabezpečování přesnosti měření živá. Tři hlavní stupně této problematiky, tedy vyjadřování nejistoty měření, určování kalibračních intervalů a budování konfirmačního systému na jedné straně obsahují nejmodernější poznatky z metrologie a na straně druhé mnoho nezodpovězených otázek a výzev do budoucna.

Globalizace průmyslové výroby i výzkumu klade velké nároky na sjednocenou metodiku vyjadřování a zajišťování přesnosti měření. Při hodnocení jakosti výrobku se posuzuje shoda předepsaných parametrů s odhady určenými nejrůznějšími měřicími technikami, přičemž vyjádřená kvalita by měla být celosvětově porovnatelná. Při vědecké práci se také klade velký důraz na přenositelnost výsledků a možnost jejich porovnání mezi různými vědeckými pracovišti.

Potřebnou standardizaci by měly zajišťovat mezinárodní normy. Například vývoj rodiny obecných norem pro jakost ISO 9000 vede k jednotnému způsobu vyjádření a vyhodnocení naměřených hodnot tak, aby získané výsledky byly kompatibilní mezi zeměmi i mezi obory. Postupně jsou upřesňovány a prohlubovány požadavky na vyjadřování spolehlivosti výsledků a jejich srovnatelnost, bez ohledu na to jakou metodou byly získány. Tyto sjednocující kroky jsou doprovázeny vývojem vědecké i průmyslové metrologie. V nedávné době také proběhly změny na úrovni legislativních zákonů a předpisů v hektickém sledu historických změn. (V roce 1986 uzavřely státy ES dohodu o vytvoření společného trhu, v roce 1993 se Československo dělí na dva samotné státy, od května 2005 se ČR stává členem EU, přičemž zákony EU jsou dle komunitárního práva harmonizovány od právního řádu ČR). Tento poměrně živý proces změn mezinárodních norem a zákonů v oblasti metrologie indikuje neustálý vývoj, který je dán nekončícím rozvojem lidského vědění a technického pokroku.

Zavádění konfirmačního systému i zavádění jednotného způsobu vyjadřování nejistot měření lze přirovnat k zavádění jednotné soustavy jednotek SI, která také nahrazovala celou řadu nekompatibilních jednotek. Teoretické myšlenky je třeba uvést do praktické aplikace v průmyslu. Nové postupy se nesetkávají v praxi s nadšením a mnohdy ani s pochopením, o čemž svědčí poznatky z různých odborných školení. Na vině jsou zejména nejasnosti v aplikaci nových přístupů a nedostatek konkrétních návodů. Proto si tato disertační práce kladla za cíl objasnit nově vyžadované postupy měření veličin a vyhodnocování výsledků.

I když se v počátcích provedené analýzy jevila nejistota měření jako definitivně nastolený standardizovaný pojem, praktické užití odhalilo nejen problematické kroky výpočtu (např. výpočet stupňů volnosti nejistoty typu B, viz kap. 3.1.6.1), které musí být vykonány se zvláštní opatrností, ale také to, že existuje slepé používání vzorců a aproximací v případech, ve kterých nemají smysl (viz výpočet koeficientu krytí v kap. 3.1.6.2). Může tudíž docházet k tomu, že celkové vyjádření výsledku ztrácí smysl.

V některých aplikacích paradoxně brání používání nejistoty měření její schopnost jednoznačně vyjádřit přesnost měření. Je tomu tak proto, že exaktně vyjádřená přesnost měření může být velice nízká. Tato situace nastává v případě, kdy je ve hře příliš mnoho obtížně popsateľných vlivů, které v řeči matematického zápisu zvětšují interval, ve kterém se může nacházet měřená veličina. Je nesporné, že když vychází obrovská

nejistota a přitom z empirických zkušeností víme, že měřenou veličinu odhadujeme dostatečně přesně pro naše účely, tak bude vůči vyjadřování nejistoty opodstatněná averze. Nejistota měření má ale i přes všechna svoje úskalí jednoznačně budoucnost. Je tomu tak proto, že standardizace je v oblasti vyjadřování výsledku měření nutností. Bez ní totiž nelze objektivně porovnávat výsledky. Od konce devadesátých let se debata kolem tohoto tématu přesunula od diskuze o tom, zda nejistotu používat, k tomu, jak ji jak ji používat. Je podivuhodné, jakou měrou narůstá míra praktických a teoretických pojednání o nejistotě měření. Tento nárůst je daný tím, že standardizace ruku v ruce s legislativou zajistila široké nasazení nejistoty jako míry přesnosti měření. Kladná i záporná reflexe a rychlé zařazení této problematiky do vyučování na technických školách je jenom přirozeným vyústěním implementačního procesu nové metodiky

Při hlubší analýze zdrojů vyvstává na povrch fakt, že většina z nich jen cituje neznámější zdroje, které byly již samy o sobě zjednodušujícím výtahem z původního standardu GUM [4]. Na problémy, které mohou vznikat, se již pozornost tolik nezaměřuje. Je to nejspíše způsobeno tím, že většina laboratoří, která se s nejistotou odborně potýkala, raději pochybnosti o jisté nejednoznačnosti obecných postupů nezveřejňovala. To je pochopitelné, protože tím by daná akreditovaná laboratoř prakticky zpochybňovala svoji schopnost dostát legislativním požadavkům a nepřímo by také sdělovala své know-how ostatním subjektům. Právě zde se naskytl prostor pro bližší analýzu vyjadřování nejistoty měření a identifikaci slabých míst výpočtu provedeno v disertační práci.

Oblast určování kalibračních intervalů se oproti vyjadřování nejistot nezdá být tak horkým tématem. Určování kalibračních intervalů je chápáno jako sofistikovaná záležitost na vysoké konfidenční úrovni. Při bližším zkoumání však vychází najevo, že pracujeme vlastně s predikcemi na základě celkem omezené datové základny. Potom velmi záleží na tom, jaký model jsme pro předpověď zvolili a jak jsme jej použili. Zde by již hlubší teoretická analýza všech možných řešení znamenala specializovanou práci velkého rozsahu, a proto bylo vybráno a popsáno jen několik metod s tím, že byly porovnány dvě, které se jeví jako nejnadějnější.

Budování konfirmačního systému, který zaštiťuje celý proces získávání naměřených dat, není již tolik záležitostí exaktních matematických a statistických výpočtů, ale spíše spadá do systémového řízení. Jedná se o systém, který by měl zajistit nejenom jednoznačně vyjádřenou přesnost měření, ale i jeho správnost. V této oblasti vymezuje standardizace jen obecné cíle a základní strukturu. Jak zajistit naplnění cílů a jak přesně vybudovat konfirmační systém, to je otázka, na kterou neexistuje jednoznačná odpověď. Konkrétní implementace zůstávají know-how jednotlivých podniků a laboratoří. Relativně otevřené v této oblasti jsou výzkumy některých zahraničních univerzit, ze kterých čerpala i tato disertační práce. Zejména se jednalo o publikaci vzniklou ze spolupráce pasadenské technické univerzity a agentury NASA [16]. Provedená teoretická analýza zjistila, že nelze vytvořit jednotný univerzální postup pro tvorbu konfirmačního systému. I když byly identifikovány základní prvky, které musí být společné pro každý vytvářený systém, v konečném důsledku budou praktické realizace rozdílné. Je zřejmé, že pro uskutečnitelný projekt vybudování metrologického konfirmačního systému je potřeba mnohaletá praxe. I z tohoto důvodu se disertační práce zaměřila na konkrétní podmnožiny konfirmačního systému, tedy na nejistotu měření a kalibrační intervaly. Je nutno zdůraznit, že tvorba konfirmačního systému se vždy odvíjí od požadované přesnosti a spolehlivosti výsledku. Disertační práce si kladla za cíl objasnit problémy, které souvisí zejména s vyššími konfidenčními hladinami.

V disertační práci se podařilo identifikovat hlavní problémy vznikajících při vyjadřování nejistoty (kap. 2.1) a navrhnout jejich řešení (kap. 3.1). Konkrétně práce obsahuje návod pro systematické identifikování zdrojů nejistot (kap. 3.1.2), jednoznačný postup pro odhad rozptylu náhodného vlivu (3.1.3), doporučený postup pro ověřování rozložení měřené veličiny (kap. 3.1.3.1 a 3.1.3.2), postup pro reflektování stupňů volnosti nejistoty typu B (kap. 3.1.6.1), posouzení vlivu nelineární korelace na výslednou nejistotu (kap. 3.1.5), jasné vysvětlení role koeficientu krytí a jeho stanovování (kap. 3.1.6.2). Práce také shrnula metody určování kalibračních intervalů (kap. 2.2) a porovnávala vybranou algoritmickou a statistickou metodu (kap. 3.2.1) s tím, že doporučuje použití metody využívající Weibullova rozložení a zahrnutí celkových nákladů na kalibraci do výpočtu kalibračního intervalu (3.2.1.1). Práce s těmito výsledky pokládá základ pro systematické vytváření konfirmačního systému jako celku. Dále bylo demonstrováno na praktickém příkladě měření přepětových ochran (kap. 4), jak může být pokročilé vyjadřování přesnosti přínosem pro celkové posuzování shody, nejen co se týká objektivnosti, ale i rychlosti zpracování množství získaných informací.

Tyto praktické výstupy práce napomáhají zlepšování zabezpečování přesnosti měření. Při systematizování identifikace zdrojů nejistoty nebude docházet k opomenutí významných zdrojů. Při rutinním použití vhodných statistických testů nebude docházet k zásadním pochybením při výběru rozložení pravděpodobnosti při kvantifikaci zdrojů nejistot. Pochopení vlivů korelací na výsledek měření pomůže nejenom výpočtu, ale i návrhu samotného měření. Uznání faktu, že i nejistoty typu B mohou mít nízké stupně volnosti zase zabrání podhodnocení nejistoty. Správná volba koeficientu krytí zajistí dosažení požadované konfidenční úrovně. Výpočet kalibračního intervalu podle cílových metrologických požadavků zajistí úsporu nákladů, ať již skrze prodloužení kalibračního intervalu nebo jeho zkrácení. Systematické zvládnutí procesu vyjadřování nejistot a kalibračních intervalů, napomohou řízení celého konfirmačního systému.

Výše zmíněné závěry pomohou vyřešit základní otázky, které vyvstávají při snaze stanovit optimální metodiku vyjadřování i zajišťování přesnosti měření. Na druhé straně tato práce naznačila otázky nové. Budou se v budoucnosti zdroje nejistoty určovat za pomoci mezinárodní databáze? Upustí se od používání standardizovaných zjednodušených matematických vztahů a dá se přednost používání kompletních matematických modelů? Dosáhne dynamické stanovování kalibračních intervalů širšího rozšíření? Co přinese další pokrok měřicí techniky a další požadavky na řádově vyšší přesnost a spolehlivost? To jsou otázky, na které odpoví až budoucí vývoj.

Tato disertační práce pokládá základ pro další teoretické i praktické řešení problémů, které vznikají při snaze objektivně popsat přesnost měření a také při snahách dosáhnout stále větší požadované přesnosti při zajištěné správnosti měření. Zároveň mohou výtahy ze syntetické části práce posloužit jako vodítko a návod pro praktické metodické pokyny v měřících laboratořích.



## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ISO, *Standards Handbook: Quantities and units (contains both ISO 31 and ISO 1000)*. 3rd edition. Geneva: International Organization for Standardization, 1993. ISBN 92-67-10185-4.
- [2] BIPM, IEL, IFCC, ISO, IUPAC, OIML, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)*. 2nd edition. Geneva: International Organization for Standardization, 1993. 60 s. ISBN 92-67-01075-1
- [3] TAYLOR, B., KUYATT, C., *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. National Institute of Standards and Technology. Physics Laboratory. NIST Technical Note 1297. 1994 edition. Washington: U.S. Government Printing Office, 1994. 26 s. Dostupné z URL <<http://emtoolbox.nist.gov/Publications/NISTTechnicalNote1297s.pdf>>
- [4] BIMP, IEL, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Corrected and reprinted 1995. Geneva: International Organisation for Standardization, 1995. 101 s. ISBN 92-67-10188-9.
- [5] JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. First edition September 2008. 120 s. Dostupné z URL <[http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf)>
- [6] ISO/IEC 17025, *General Requirements for the Competence of Calibration and Testing Laboratories*. Geneva: International Organization for Standardization, 1999.
- [7] ČSN P ISO/TS 14253-3, *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Zkoušení součástí a měřidel měřením - Část 3: Směrnice k dosažení souhlasu při určování nejistot měření*. Praha: Český normalizační institut, 2005
- [8] Nařízení vlády č. 148/2006 Sb., *o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*.
- [9] Směrnice Komise 2005/38/ES, *kteřou se stanoví metody odběru vzorků a metody analýzy pro úřední kontrolu množství fusariových toxinů v potravinách*, 32005L0038.
- [10] ČSN EN ISO 10012, *Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [11] ČSN EN ISO/IEC 17025, *Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří (General Requirements for the Competence of Calibration and Testing Laboratories)*. Praha: Český normalizační institut, 2001
- [12] ČSN EN ISO 9000, *Systémy managementu kvality - Základní principy a slovník*. Praha: Český normalizační institut, 2000
- [13] Working Group 2 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM-WG 2), *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, Final draft 2006-08-01. Dostupné z URL <[http://www.ncsli.org/vim/wg2\\_doc\\_N318\\_VIM\\_3rd\\_edition\\_2006-08-01%20\(3\).pdf](http://www.ncsli.org/vim/wg2_doc_N318_VIM_3rd_edition_2006-08-01%20(3).pdf)>

- [14] ISO 10012, *Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measuring equipment*, Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
- [15] BIMP, IEL, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Geneva: International Organisation for Standardization, 1993.
- [16] CASTRUP, H., T., EICKE, W.G., *Metrology – Calibration and Measurement Processes*, Pasadena: California Institute of Technology & Jet Propulsion Lab., 1999.
- [17] ČSN EN ISO 10012-1, *Požadavky na zabezpečování jakosti měřicího zařízení – Část 1: Metrologický certifikační systém pro měřicí zařízení*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
- [18] KROUWER, J., S., KRISTIANSEN, J., Point and counterpoint (Point Critique of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement Method of Estimating and Reporting Uncertainty in Diagnostic Assays, Counterpoint The Guide to Expression of Uncertainty in Measurement Approach for Estimating Uncertainty: An Appraisal), *Clinical Chemistry: International Journal of Molecular Diagnostics and Laboratory Medicine*, 2003, 49:11, s. 1818-1829. ISSN 0009-9147. Dostupné z URL  
<<http://www.clinchem.org/cgi/reprint/49/11/1822.pdf>>
- [19] PETERSEN, P., H., JØRGENSEN, L., G., M., JENSEN, E., KYNDE, K., BRANDSLUND, I., SANDBERG, S., STAHL, M., Is GUM injurious? - Or just superfluous? (Er GUM skadelig ? - eller blot overflødig), *Klinisk Biokemi i Norden*, 2003; 15(2), s. 27-31. ISSN 1101-2013. Dostupné z URL  
<<http://www.westgard.com/guest24.htm>>
- [20] HRUŠKA, K., BRADÍK, J., *Nejistoty stanovení jakosti a jejich vliv na ztráty*, Brno: PC-DIR Real, 1998. 64 s. ISBN 80-214-1276-3
- [21] ČIA, ILAC - G8:1996, *Směrnice k posuzování a prokazování shody se specifikací (založených na měřeních a zkouškách v laboratoři)*. Praha: Český institut pro akreditaci, 2004. Dostupné z URL  
<[http://www.cai.cz/files/01\\_08-P026%20ILAC-G8\\_20061023.pdf](http://www.cai.cz/files/01_08-P026%20ILAC-G8_20061023.pdf)>
- [22] UKAS, *The Expression of Uncertainty in Testing (LAB 12)*. Edition 1. Feltham: United Kingdom Accreditation Service, 2000. Dostupné z URL  
<<http://www.ukas.com/Library/downloads/publications/LAB12.PDF>>
- [23] WELMEC, *Guide for the assessing and operation of Notified Bodies performing conformity assessment according to the Directive 90/384/EEC*. Teddington: WELMEC European cooperation in legal metrology, 1999. Dostupné z URL  
<<http://www.welmec.org/publications/4-1.pdf>>
- [24] *Směrnice Rady 90/384/EEC, o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se vah s neautomatickou činností*, 31990L0384.
- [25] HRUŠKA, K., BRADÍK, J., *Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti*. Brno: Vysoké učební technické Brno, 2001. 113 s. ISBN 80-214-1656-1.
- [26] ČIA, EA 4/02, *Vyjadřování nejistot měření při kalibracích*. Praha: Český institut pro akreditaci, 2000. Dostupné z URL  
<[http://www.cai.cz/files/01\\_08-P001%20EA%2004\\_02\\_20061023.pdf](http://www.cai.cz/files/01_08-P001%20EA%2004_02_20061023.pdf)>

- [27] BIPM, *Recommendation INC-1 - Expression of Experimental Uncertainties*, 1980
- [28] CIPM, Recommendation CI-1981, In *Proc. Verb. Com. Int. Poids et Mesures 49*, 1981.
- [29] CIPM, Recommendation CI-1986, In *Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures 54*, 1986.
- [30] NIST/SEMATECH, *e-Handbook of Statistical Methods*, 2003. [cit. 2006-07-22] Dostupné z URL <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>
- [31] EURACHEM/CITAC, *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (QUAM)*, Second edition. 2000. Dostupné z URL <<http://www.measurementuncertainty.org/mu/guide/>>
- [32] Zákon č. 505/1990 Sb., *o metrologii*.
- [33] ASLAB, *Informace pro zájemce o mezilaboratorní porovnávání zkoušek*. Praha: ASLAB - Středisko pro posuzování způsobilosti laboratoří. 2007. Dostupné z URL <<http://aslab.vuv.cz/Dokumenty/Mpz/infoMPZ.pdf>>
- [34] ISO/IEC, *G. 43: Proficiency testing by interlaboratory comparisons*. Geneve: International Organisation for Standardization, 1997.
- [35] ILAC, *G13: Guidelines for the Requirements for the Competence of Providers of Proficiency Testing Schemes*. Silverwater: International Laboratory Accreditation Cooperation, 2000. Dostupné z URL <[http://www.ilac.org/documents/WhatsNew.G13\\_07\\_2007.pdf](http://www.ilac.org/documents/WhatsNew.G13_07_2007.pdf)>
- [36] EURACHEM, *The Fitness for Purpose of Analytical Methods - A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics*. Middlesex: EURACHEM Working Group, 1998. ISBN: 0-948926-12-0. Dostupné z URL <<http://www.eurachem.org/guides/valid.pdf>>
- [37] ČSN ISO 5725, *Přesnost (správnost a shodnost) metod a výsledků měření*. Praha: Český normalizační institut, 1997
- [38] ISO 13528, *Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons*, Geneve: International Organisation for Standardization, 2005.
- [39] Vyhláška ministerstva průmyslu a obchodu č. 262/2000 Sb., *kteřou se zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření*.
- [40] DAP, *TM 08 - Guideline for the Determination of Calibration Intervals of Measuring Equipment*. Charlottenburg: Deutsches Akkreditierungssystem prüfwesen GmbH, 2002. Dostupné z URL <<http://www.dap.de/95doc/DAP-TM-08.pdf>>
- [41] Zákon č.22/97 Sb, *o technických požadavcích na výrobky*.
- [42] JELÍNEK, F., *Stanovování rekalibračních intervalů*, Prezentační materiál školení „Kurz metrologů“. Praha: Český metrologický institut, 2005.
- [43] Recommended Practice RP-1, *Establishment and Adjustment of Calibration Intervals*, NCSL, 1996
- [44] Integrated Sciences Group, *Method A3 - Interval Test Method - Description of the Methodology*, 2003-2004. Dostupné z URL <<http://www.isgmax.com/Freeware/A3%20Method.pdf>>

- [45] WAYTT, D., W., CASTRUP, H., T., Managing Calibration Intervals, In *NCSL 1991 Annual Workshop & Symposium*, Albuquerque: NCSL International, 1991. Dostupné z URL <[http://www.isgmax.com/Articles\\_Papers/MGCALINT.pdf](http://www.isgmax.com/Articles_Papers/MGCALINT.pdf)>
- [46] WEIBULL, W., A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *Journal Of Applied Mechanics*, American Society of Mechanical Engineers, 1951, s. 293-297. ISSN 0021-8936
- [47] ABERNETHY, R., B., *The New Weibull Handbook: Reliability & Statistical Analysis for Predicting Life, Safety, Survivability, Risk, Cost and Warranty Claims*. Fourth Edition. Florida: Robert B. Arbernethy, 2003. ISBN 0-9653062-1-6
- [48] NOVOTNÝ, R., Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti, *Elektrorevue – časopis pro elektrotechniku*, 2002/17. ISSN 1213-1539. Dostupné z URL <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02017/index.html>>
- [49] FULTON, W., WeibullSMITH™ [počítačový program], Version 4.0WH, Fulton Findings, 2004
- [50] LUDVÍK, V., Komentář k vydání ČSN EN ISO 10012, Praha: Český normalizační institut, 2004. ISBN 80-7283-147-X.
- [51] ČSN ISO/TR 10013, Směrnice pro dokumentaci systému managementu jakosti, Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [52] ČSN 010115, Mezinárodní slovník základních a všeobecných metrologických termínů, Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [53] CASTRUP, H., Estimating Category B Degrees of Freedom, In *Proceedings of Measurement Science Conference*. Anahaeim: 2000. Dostupné z URL <[http://www.isgmax.com/Articles\\_Papers/MSC2000.pdf](http://www.isgmax.com/Articles_Papers/MSC2000.pdf)>
- [54] CASTRUP, H., *An Investigation into Estimating Type B Degrees of Freedom*, 2001, Dostupné z URL <[http://www.isgmax.com/Articles\\_Papers/Type%20B%20Degrees%20of%20Freedom%20Study.pdf](http://www.isgmax.com/Articles_Papers/Type%20B%20Degrees%20of%20Freedom%20Study.pdf)>
- [55] HUSAIN, R. AN-NAHDI, K, Uncertainty Calculations in a Measurement Standards Laboratory, *Proc. Natl. Sci. Counc.*, Vol. 24, No. 3, 2000. s. 210-215.
- [56] HALL, B., Computer modelling of uncertainty calculations with finite degrees of freedom, *Measurement Science and Technoogy*, 11/2000. UK: IOP Publishing Ltd, 2000. s. 1335–1341. Dostupné z URL <<http://www.iop.org/EJ/S/3/1971/XL7GfvWtCkGVp.VshaZvYw/article/0957-0233/11/9/311/e00911.pdf>>
- [57] BARRINGER, H., P., Cost Effective Calibration Intervals Using Weibull Analysis, In *ASQC 49th Annual Quality Congress Proceedings*. Cincinnati: Convention Center Cincinnati, 1995. Dostupné z URL <[http://www.barringer1.com/pdf/Cost\\_Effective\\_Calibration.pdf](http://www.barringer1.com/pdf/Cost_Effective_Calibration.pdf)>
- [58] ABERNETHY, R., B., *Measurement Uncertainty Handbook*, NC: Instrument Society of America, 1980.
- [59] GREB, D., J., Calibration Intervals Specification and Instrument Quality, *Journal of Quality Technology*, American Society for Quality, 1979. ISSN 0022-4065

- [60] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M., Nejistoty v měření I: Vyjadřování nejistot, *Automa*, 2001, No. 7-8, s. 50-54, ISSN 1210-9592
- [61] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M., Nejistoty v měření II: Vyjadřování nejistot, *Automa*, 2001, No. 10, s. 52-56, ISSN 1210-9592
- [62] KIRKUP, L., *Calculating and Expressing Uncertainty in Measurement*, University of technology Sydney. New South Wales, 2007. Dostupné z URL <[www.science.uts.edu.au/physics/uncertainty.pdf](http://www.science.uts.edu.au/physics/uncertainty.pdf)>
- [63] GUTHRIE, W.F.: *Should (T1- T2) have larger uncertainty than T1?*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2002. Dostupné z URL <<http://www.itl.nist.gov/div898/pubs/author/guthrie/guthrie-2002-01.pdf>>
- [64] ČERMÁK, V., *Patří do jmenovatele výběrového rozptylu n nebo n -1? Nikoliv, patří tam n + 1!*, Informační Bulletin České statistické společnosti, číslo 2, duben 1995, ročník 6., ISSN 1210-8022, Dostupné z URL <[www.statspol.cz/bulletiny/ib-95-2.pdf](http://www.statspol.cz/bulletiny/ib-95-2.pdf)>
- [65] ANĐEL, J., *Výběrový rozptyl*, Informační Bulletin České statistické společnosti, číslo 3, říjen 1995, ročník 6., ISSN 1210-8022, Dostupné z URL <<http://www.statspol.cz/bulletiny/ib-95-3.pdf>>
- [66] FRANK, P., *Problémy vznikající při vyjadřování nejistoty měření*, sborník příspěvků 34. mezinárodní konference Defektoskopie 2004, Brno 2004, s. 43 - 50, ISBN 80-214-2749-3
- [67] ZAPLETAL, A., ústní konzultace o statistických testech normality, konfidenčních intervalech a způsobech výpočtu výběrové směrodatné odchylky. Červenec 2007.
- [68] ČSN 01 0225, *Testy shody empirického rozložení s teoretickým*, Praha: Vydavatelství ÚNM, 1981.
- [69] SMITH, C., L., *Uncertainty Propagation Using Taylor Series Expansion and a Spreadsheet*, Journal of the Idaho Academy of Science, Vol. 30, Issue 2, December 1994, s. 93-105. Dostupné z URL: <[https://saphire.inl.gov/pdf/TSE\\_Paper.pdf](https://saphire.inl.gov/pdf/TSE_Paper.pdf)>
- [70] TOŠENOVSKÝ, J., ústní konzultace obsahu rozpracované disertační práce, věnovaná zejména možnosti ověření správného výpočtu směrodatné odchylky pomocí simulace. Leden 2006.
- [71] *MATLAB® The Language of Technical Computing* [počítačový program], Version 6.0.0.88 Release 12, MathWorks, Inc.
- [72] KAHÁNEK, P., Generátor náhodných čísel v MATLABu, In *Sborník příspěvků 13. ročníku konference MATLAB 2005*, Dostupné z URL <[http://dsp.vscht.cz/konference\\_matlab/matlab05/prispevky/kahanek/kahanek.pdf](http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab05/prispevky/kahanek/kahanek.pdf)>
- [73] VELDHUIS, J., EVANS, W., JOHNSON, M., Complication Effects of Highly Correlated Model Variables on Nonlinear Least-Square Estimates of Unique Parameter Values and Their Statistical Confidence Intervals: Estimating Basal Secretion and Neurohormone Half-Life by Deconvolution Analysis, *Methods in the Neuroscience*, Academic press 1995, volume 28, s. 130-138, ISSN 1043-9471.

- [74] JCGM 101:2008, *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. First edition 2008. 82 s. Dostupné z URL < [http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_101\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf) >
- [75] SANTARIUS, P., *Zachování kvality dodávané elektrické energie při nárůstu úrovně rušivých vlivů v distribučních sítích*, Závěrečná zpráva GAČR čís. 102/99/1000, Ostrava: 2001.
- [76] HUDEC, J., *Přepětí a elektromagnetická kompatibilita*. Hradec Králové: HAKEL, 1996. ISBN 80-902201-0-X
- [77] Směrnice Rady Evropských společenství EU 89/366/EEC, *o sbližování zákonů členských států týkajících se elektromagnetické kompatibility*.
- [78] Nařízení vlády č. 18/2003 Sb., *kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility*.
- [79] WIESINGER, J., HASSE, P., ZISCHANK, W. *Handbuch für Blitzschutz und Erdung*. München: Universität der Bundeswehr, 2006.
- [80] HAKEL, *Svodiče napětí – katalog 2004*, Hradec Králové: HAKEL spol. s r.o., 2004
- [81] BERGER., K., *Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore in den Jahren 1963-1971*. 1972
- [82] IEC 61643-1, *Low-voltage surge protective devices - Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Requirements and tests*, :1st edition, 1998
- [83] IEC 61643-1, *Low-voltage surge protective devices - Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Requirements and tests*,: 2nd edition, 2005
- [84] ČSN EN 61643-11, *Ochrany před přepětím nízkého napětí - Část 11: Přepětěťová ochranná zařízení zapojená v sítích nízkého napětí - Požadavky a zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [85] ČIA, *Kalibrační list č. 113-KL-5806-03*. Praha: Český metrologický institut, 2003.
- [86] MAREK, J, *Postup kontroly parametrů generátoru RG 550*, část interního dokumentu firmy HAKEL s.r.o.
- [87] TEXTRONIX, *Číslicové paměťové osciloskopy řada TDS1000 a TDS2000 Uživatelská příručka*, Vyškov: ELSYST Engineering, 2002.
- [88] ELFARD, S., *Evaluation of quality assurance in electrical products*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2005. 126 s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Karel Hruška, DrSc.

Doplňující normy:

- [89] ČSN 330120, *Elektrotechnické předpisy - Normalizovaná napětí IEC*. Praha: Český normalizační institut, 2001.

- [90] ČSN 330121, *Elektrotechnické předpisy - Jmenovitá napětí veřejných distribučních sítí nn*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [91] ČSN 330122, *Pokyn na používání evropské normy EN 50160*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [92] ČSN 330128, *Elektrotechnické předpisy. Jmenovité kmitočty od 0,1 do 10 000 Hz a jejich dovolené odchylky*. Praha: Československá společnost normalizační, 1985
- [93] ČSN EN 50160, *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [94] ČSN EN 60059, *Normalizované hodnoty proudů IEC*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [95] ČSN EN 60664, *Koordinace izolace zařízení nízkého napětí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [96] ČSN EN 61010, *Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [97] ČSN IEC 60-1, *Technika zkoušek vysokým napětím. Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [98] ČSN EN 61000-4-5, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – část 4-5: Zkušební a měřicí technika – Rázový impuls – Zkouška odolnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1997.

## **7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures (International Bureau of Weights and Measures) - Mezinárodní úřad pro váhy a míry
CEN/CENELEC	Comité Européen de Normalisation/Comité européen de normalisation en électrotechnique - Evropský výbor pro normalizaci /Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
CIPM	Comité international des poids et mesures - Mezinárodní výbor pro váhy a míry
CMR	Customer metrological requirements - metrologické požadavky zákazníka
ČIA	Český institut pro akreditaci
ČMI	Český metrologický institut
ČNI	Český normalizační institut
ČSN	Česká státní norma
ČR	Česká republika
DSO	Digital storage oscilloscope – format záznamu dat z digitálního osciloskopu
EA	European co-operation for Accreditation - Evropská spolupráce v oblasti akreditace
EMC	Electromagnetic Compatibility – Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Electromagnetic Interference – Elektromagnetické rušení
EMS	Electromagnetic Susceptibility – Elektromagnetická citlivost (odolnost)
EU	European Union – Evropská unie
HDO	Hromadné dálkové ovládání – regulace odběru elektrické energie na dálku
IEC	International Electrotechnical Commission - Mezinárodní elektrotechnická komise
IFCC	International Federation of Clinical Chemistry - Mezinárodní federace pro klinickou chemii a laboratorní medicínu
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation - Mezinárodní spolupráce pro akreditaci laboratoří
ISO	International Organisation for Standardization - Mezinárodní organizace pro standardizaci
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry - Mezinárodní unie pro čistou a užitou chemii
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics - Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou fyziku
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
MEMC	Measuring equipment metrological characteristic - Metrologické charakteristiky měřicího vybavení
NCSLI	National Conference of Standards Laboratories
NDT	Non-Destructive Testing – Nedestruktivní zkoušení



- OIML International Organisation of Legal Metrology - Mezinárodní organizace pro legální metrologii
- SI Mezinárodně domluvená soustava jednotek, která se skládá ze základních jednotek, odvozených jednotek, předpon a vedlejších jednotek. Mezinárodně garantuje definice jednotek a uchování etalonů BIPM. V ČR zajišťuje tuto službu ČMI. SI je zkratka francouzského „Le Système international d'unités“ a znamená mezinárodní systém jednotek.
- SPD Surge Protective Device – Přepět'ová ochrana
- ÚNMZ Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAKŮ

V této disertační práci jsou použity symboly a znaky dle mezinárodního standardu ISO 31 - Veličiny a jednotky [1] a použité jednotky veličin jsou jednotky soustavy SI. Pro jednoznačný výklad následuje výčet symbolů, které se objevují v práci, a u kterých by mohlo dojít k záměně za stejné symboly jiného významu. Zejména je potřeba opatrně rozlišovat mezi napětím a rozšířenou nejistotou. Protože tato práce je z oboru elektrotechniky, tak nebylo vhodné měnit symbol pro napětí, ale zároveň taktéž nebyla žádoucí změna značení rozšířené nejistoty. V následující práci se symbol  $U$  používá pro rozšířenou nejistotu a pro napětí se používá symbol  $U$  s různými indexy, dle aplikace.

$\alpha$	hladina významnosti	$l_{min}$	minimální povolený kalibrační interval
$\beta$	parametr lichoběžníkového rozložení pravděpodobnosti	$l_p$	průměrný zjištěný interval
$\vartheta$	pracovní teplota	$l_r$	doporučený kalibrační interval
$\mu_q$	očekávaná střední hodnota veličiny $q$	$l_z$	zkoušený kalibrační interval
$\nu$	počet stupňů volnosti	$m$	hmotnost
$\nu_{ef}$	efektivní stupně volnosti	$m_p$	počet parametrů při výpočtu metodou nejmenších čtverců
$\sigma$	směrodatná odchylka	$n$	počet měření, resp. počet dat
$\sigma^2$	rozptyl	$N$	počet náhodných veličin
$a$	pološíře	$p$	hladina konfidence
$a_+$	horní mez	$p_i$	koeficient složky nejistoty
$a_-$	dolní mez	$p_L$	dolní kontrolní limit
$b$	parametr tvaru Weibullova rozložení	$p_U$	horní kontrolní limit
$C$	konfidence změny kalibračního intervalu	$q$	odhad očekávané hodnoty veličiny
$c_i$	koeficient citlivosti	$\bar{q}$	střední hodnota
$f$	funkce	$\underline{q}_k$	hodnota nezávislého měření
$g$	parametr umístění Weibullova rozložení	$r$	střední hodnota
$h$	parametr stupnice Weibullova rozložení	$r(x_i^{(k)}, x_j^{(k)})$	odhadnutý výběrový korelační koeficient
$i$	index	$r(\bar{X}_i^{(k)}, \bar{X}_j^{(k)})$	odhadnutý korelační koeficient vstupních středních hodnot
$I_{max}$	maximální proud	$r_{BA}$	poměr nejistot typu A a nejistot typu B
$I_n$	jmenovitý proud	$R_{cílová}$	cílová spolehlivost
$I_{peak}$	vrcholový proud	$R_{zjištěná}$	zjištěná spolehlivost
$I_{SC}$	zkratový proud	$s$	výběrová směrodatná odchylka
$j$	index	$s^2$	výběrový rozptyl
$k$	koeficient krytí	$s(\bar{q})$	výběrová směrodatná odchylka od průměru
$k$	index	$s^2(\bar{q})$	výběrový rozptyl od průměru
$k_p$	koeficient krytí pro konfidenční úroveň $p$	$s(q_k)$	výběrová směrodatná odchylka charakterizující kolísání pozorovaných hodnot $q_k$
$l_{avg}$	průměrný kalibrační interval		
$l_{lng}$	nejdelší zjištěný kalibrační interval		
$l_{max}$	maximální povolený kalibrační interval		

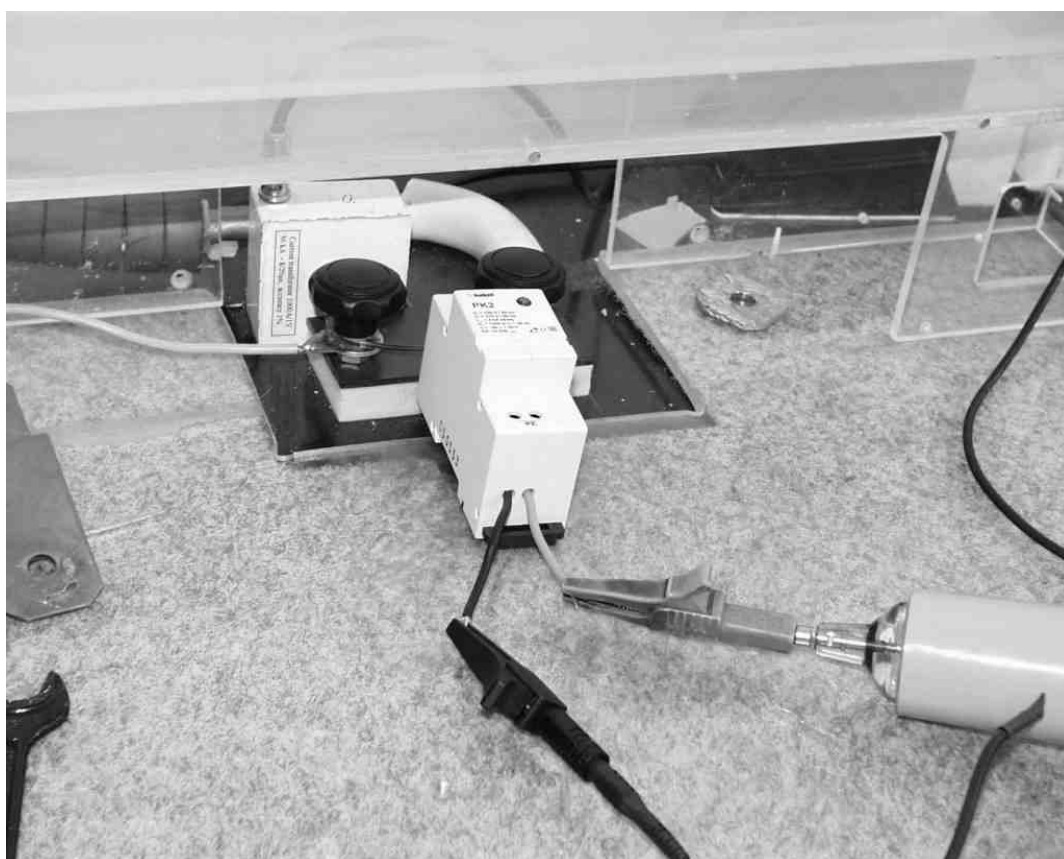
$s(\bar{q}, \bar{r})$	odhad kovariance průměrů $\bar{q}$ a $\bar{r}$
<i>směrnice</i>	směrnice přímky
$t_A$	doba odezvy
$t_{kalib.}$	délka kalibračního intervalu
$t_{krytická}$	doba po kalibraci, za kterou předpokládáme, že se sledovaný parametr dostane mimo požadované meze
$t_p(\nu)$	koeficient Studentova rozdělení s $\nu$ stupni volnosti při pravděpodobnosti $p$
$T_1$	charakteristický čas čela vlny
$T_2$	charakteristický čas týlu vlny
$u$	standardní nejistota měření
$u^2$	rozptyl nejistoty měření
$u(x_i)$	standardní nejistota spojená s odhadem vstupní veličiny $x_i$
$u_A$	standardní nejistota typu A
$u_A^2$	rozptyl typu A
$u_B$	standardní nejistota typu B
$u_B^2$	rozptyl typu B
$u_c$	standardní kombinovaná nejistota
$u_c^2$	kombinovaný rozptyl
<i>úsek</i>	úsek vyřatý přímkou na ose y
$U$	rozšířená nejistota
$U_C$	maximální trvalé pracovní napětí
$U_{OC}$	napětí při chodu na prázdko
$U_p$	rozšířená nejistota s vyjádřenou hladinou konfidence
$U_P$	ochranná úroveň
$U_{nab}$	nabíjecí napětí
$U_N$	jmenovité napětí
$w$	relativní standardní nejistota
$W$	kritérium W při porovnávání empirického rozložení s teoretickým
$W^*$	kvantil testovaného kritéria normality
$x_i$	odhad vstupní veličiny
$X_i$	vstupní veličina
$y$	odhad měřené veličiny
$Y$	výstupní měřená veličina

## **9 SEZNAM PŘÍLOH**

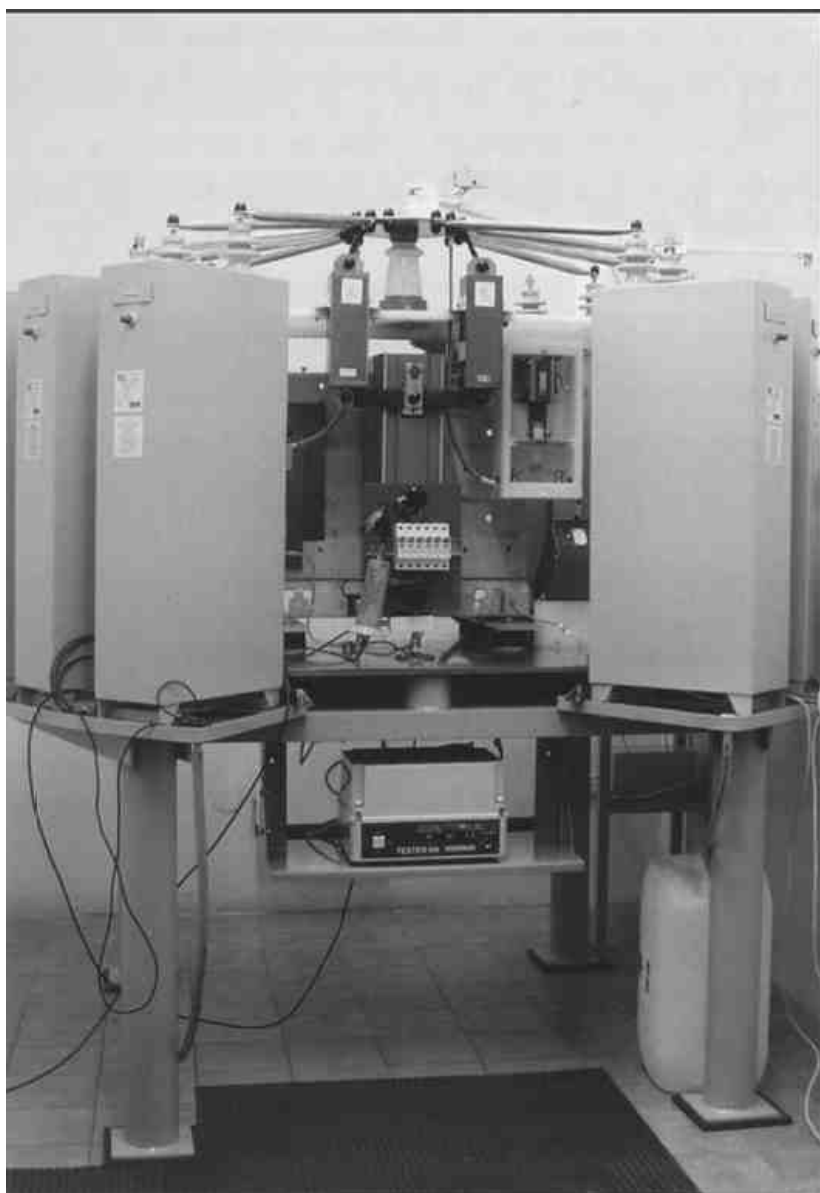
A.	Fotografie měřicího pracoviště	str. 149
B.	Generátor bleskových proudů	str. 150
C.	Prohlášení o shodě	str. 151
D.	Systém detekce blesků nad ČR a Evropou	str. 152
E.	Výtah z naměřených hodnot	str. 153
F.	Využití softwaru při vyjadřování a zajišťování výsledku měření	str. 159
G.	Elektronická příloha	str. 158
H.	Odborný životopis	str. 159
I.	Curriculum Vitae	str. 162

## 10 PŘÍLOHY

### A. Fotografie měřicího pracoviště



## B. Generátor bleskových proudů



## C. Prohlášení o shodě přepět'ové ochrany PK2



# ES PROHLÁŠENÍ O SHODĚ

My, Hakil spol. s r.o.

prohlašujeme na svou výlučnou odpovědnost, že

**Výrobek:** Přepět'ová ochrana

**Typ / model:** PK 2

je ve shodě s následujícími normami:

České normy	Evropské normy
ČSN 34 5615 (84) ČSN 35 4515 (69) ČSN EN 60695-2-1 (98) ČSN EN 60730-1 (97) ČSN EN 61000-4-5 (97) ČSN EN 50082-2 (94)	IEC 61643-11:2002

a následujícími nařízeními vlády (NV), ve znění pozdějších předpisů (v závorce uvedeno číslo EU směrnice):

NV 17/2003 Sb. v platném znění	73/023/EEC, 89/336/EEC – including amendments
--------------------------------	---

Místo vydání: Hradec Králové

Jméno zástupce výrobce a podpis: Ing. J. Hudec, Ph.D.

Datum vydání: 02.01.2006

Funkce: ředitel společnosti



VÝROBCE SVODIČŮ PŘEPĚTÍ, BRŮ ŠTEFANŮ 980, 500 03 HRADEC KRÁLOVÉ,  
ČESKÁ REPUBLIKA,

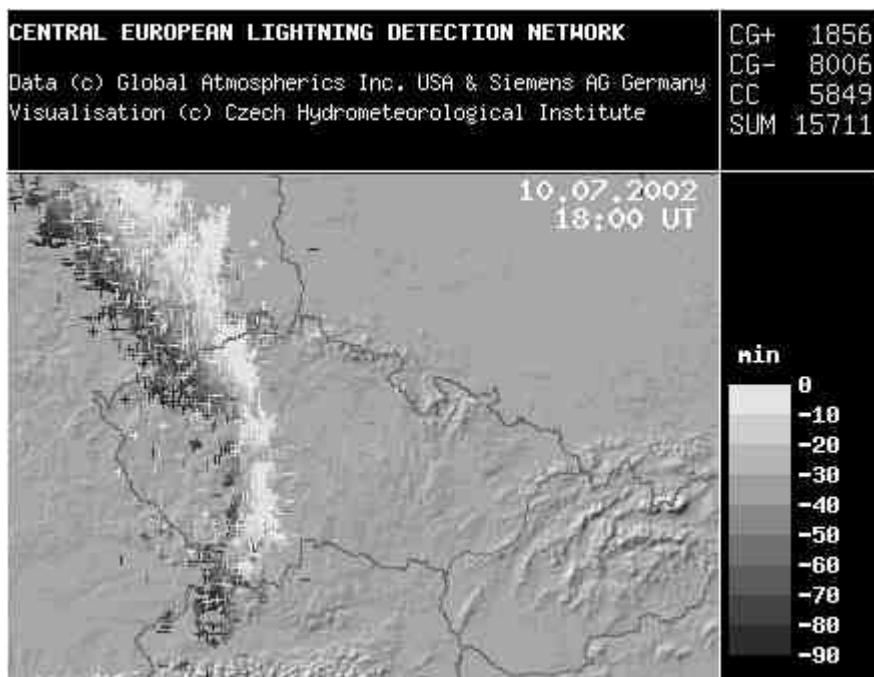
IČO: 62028006, DIČ: CZ62028006

Obchodní rejstřík: vedený Krajským soudem v Hradci Králové oddíl C, vložka 6993

Tel: +420 495 401 321, Fax: +420 495 541 816, GSM: +420 602 124 468

<http://www.hakil.cz>, E-mail: [info@hakil.cz](mailto:info@hakil.cz)

## D. Systém detekce blesků nad ČR a Evropou



Na obrázku Českého hydrometeorologického ústavu je vidět počet bleskových výbojů zaznamenaným za 90 minut. Záznam je součástí projektu Central European Lightning Detection Network.



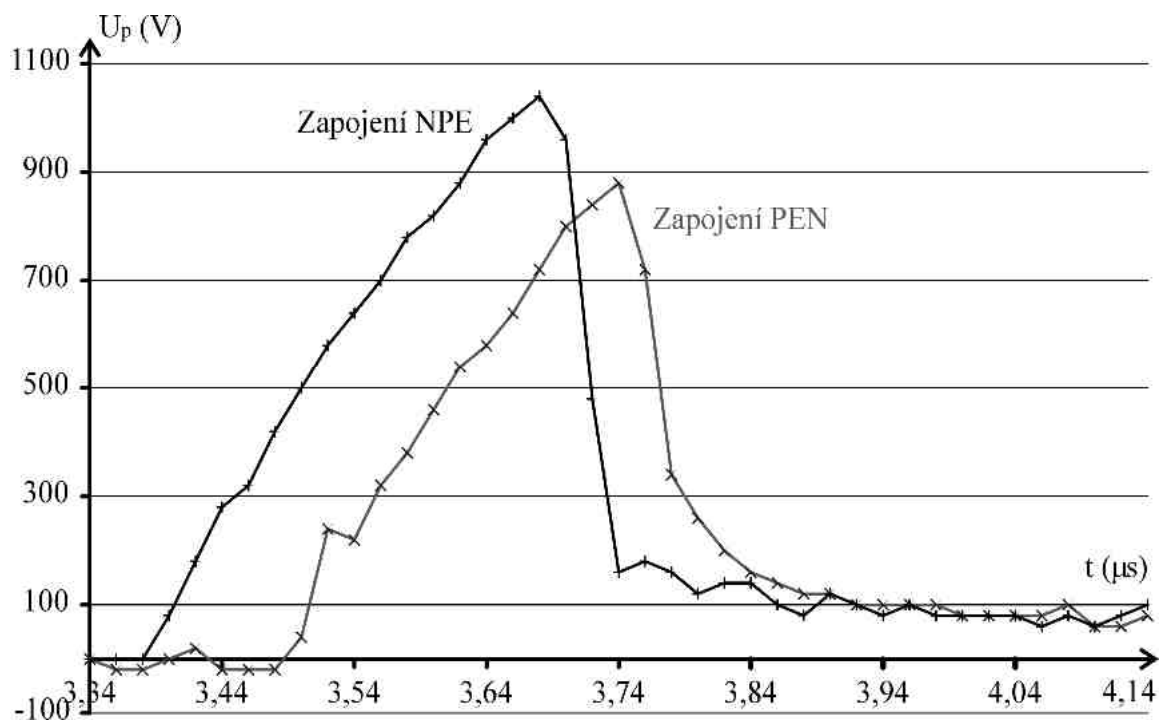
## E. Výťah z naměřených hodnot

Pro posouzení shody měřeného vzorku je třeba zpracovat všechny naměřené hodnoty. Musí být zaznamenány a zpracovány kompletní záznamy z obou kanálů připojeného osciloskopu. Vzhledem k rozsahu provedeného měření není možné v papírové příloze poskytnout více než fragment naměřených dat. V následující Tab. 10.1. je zaznamenán výťah ze syrových dat z osciloskopu, který dobře ilustruje povahu naměřených dat. Jedná se o proudový a napěťový průběh pro zapojení N-PE a PE-N při nabíjecím napětí  $U_{nab} = 2,4 \text{ kV}$ .

Tab. 10.1: Výťah z naměřených hodnot pro proudový a napěťový průběh na přepěťové ochraně PK2 při zapojení NPE/PNE a při nabíjecím napětí  $U_{nab} 2,4 \text{ kV}$ .

$U_{nab} = 2,4 \text{ kV}$					$U_{nab} = 2,4 \text{ kV}$					$U_{nab} = 2,4 \text{ kV}$				
NPE		PEN			NPE		PEN			NPE		PEN		
Ch A	Ch B	Ch A	Ch B	Ch B	Ch A	Ch B	Ch A	Ch B	Ch B	Ch A	Ch B	Ch A	Ch B	
t [μs]	u [V]	u [V]	u [V]	u [V]	t [μs]	u [V]	u [V]	u [V]	u [V]	t [μs]	u [V]	u [V]	u [V]	u [V]
<b>Počátek měření</b>					3,44	40	280	0	-20	4,12	100	80	120	60
0,00	-20	0	-20	-20	3,46	0	320	0	-20	4,14	120	100	80	80
0,02	-40	-20	-20	0	3,48	-20	420	-40	-20	...				
0,04	-20	-20	20	-20	3,50	-40	500	-120	40	<b>Konec měření</b>				
0,06	0	-20	0	-20	3,52	0	580	-20	240	49,40	-100	-40	-100	-40
0,08	-40	0	-40	-20	3,54	-20	640	40	220	49,42	-100	-20	-120	-40
0,10	-40	-20	-40	-20	3,56	-40	700	0	320	49,44	-80	-20	-100	-40
0,12	0	-20	-20	20	3,58	-20	780	-40	380	49,46	-100	-40	-100	-40
0,14	-40	-20	0	-20	3,60	-20	820	-40	460	49,48	-100	-20	-80	-60
0,16	-60	-40	-40	-40	3,62	-20	880	-60	540	49,50	-100	-40	-100	-40
0,18	-40	0	-20	0	3,64	-20	960	20	580	49,52	-120	-40	-100	0
0,20	-40	-20	-20	-20	3,66	-60	1000	20	640	49,54	-100	-20	-60	-60
0,22	-40	-20	-40	-20	3,68	-20	<b>1040</b>	-720	720	49,56	-100	-20	-80	-40
0,24	-20	0	20	-20	3,70	0	960	-60	800	49,58	-80	-40	-120	-40
0,26	-60	-20	0	-20	3,72	80	480	-40	840	49,60	-100	-40	-100	-40
0,28	20	0	-20	-40	3,74	80	160	-60	<b>880</b>	49,62	-80	-40	-100	-20
0,30	-20	-40	-20	-20	3,76	0	180	-60	720	49,64	-100	-40	-80	-60
0,32	0	-20	-40	-20	3,78	40	160	20	340	49,66	-120	-60	-100	-40
0,34	-40	-20	-20	0	3,80	40	120	60	260	49,68	-100	0	-100	-20
0,36	-20	0	-40	-40	3,82	60	140	60	200	49,70	-80	-60	-100	-40
0,38	-20	-20	-40	-20	3,84	60	140	60	160	49,72	-100	-40	-120	-40
0,40	-20	-20	-40	-20	3,86	100	100	60	140	49,74	-80	-40	-60	-20
0,42	0	-20	0	-20	3,88	80	80	20	120	49,76	-120	-40	-80	-40
0,44	-20	-20	-20	-20	3,90	60	120	20	120	49,78	-60	0	-100	-40
0,46	-40	0	-20	-20	3,92	60	100	40	100	49,80	-80	-20	-120	-40
0,48	0	0	-20	-20	3,94	60	80	60	100	49,82	-80	-40	-100	-40
0,50	-20	-20	-40	-20	3,96	60	100	80	100	49,84	-80	-40	-100	-40
...					3,98	80	80	40	100	49,86	-100	-20	-80	-40
<b>Oblast kolem max. napětí</b>					4,00	120	80	120	80	49,88	-80	-20	-100	-20
3,34	-20	0	-20	0	4,02	100	80	80	80	49,90	-100	-60	-100	-20
3,36	-20	0	0	-20	4,04	120	80	80	80	49,92	-80	-40	-80	-20
3,38	20	0	0	-20	4,06	120	60	60	80	49,94	-100	-40	-80	-40
3,40	60	80	-20	0	4,08	140	80	60	100	49,96	-100	-20	-120	-40
3,42	-40	180	-40	20	4,10	120	60	120	60	49,98	-80	-20	-120	-40

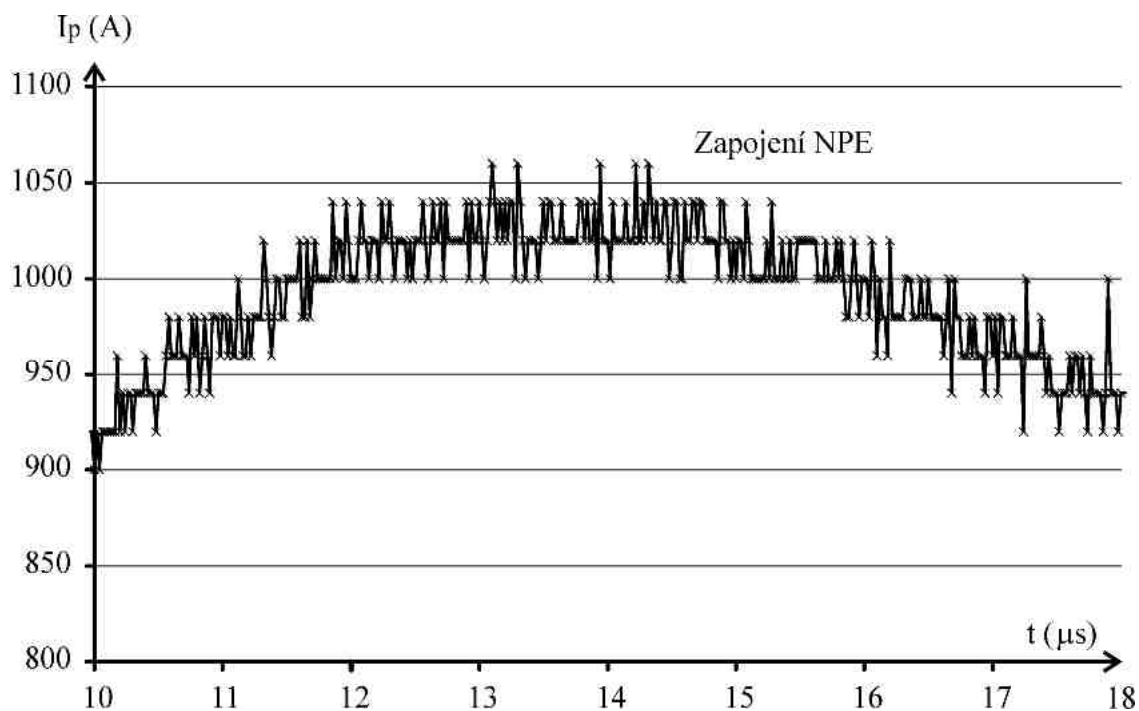
Kanál A zachycuje proudový a kanál B napěťový průběh. Oba měřené kanály jsou samozřejmě zaznamenány jako měřené napětí. Kvůli použitému měřicímu transformátoru odpovídá u kanálu A naměřená hodnota přímo hodnotě proudu v Ampérech. Nabíjecí napětí 2,4 kV nebylo zvoleno nijak cíleně, podobné tvary průběhů byly bez větších odchylek zaznamenány při nižších i vyšších  $U_{nab}$ . Zachycen je začátek (0-0,5  $\mu$ s), peak (3,34-4,14  $\mu$ s) a konec (49,4-50  $\mu$ s) naměřených dat. V tabulce je tučně vyznačeno maximum pro napěťový průběh. Vzhledem ke strmosti zaznamenaných hodnot kolem tohoto maxima je jasné, že skutečná hodnota amplitudy se může od změřené hodnoty lišit. Je to způsobeno tím, že ani nejjemnější časová základna s jakou je osciloskop schopen měřit nedokáže dostatečně přesně zaznamenat tak rychlý děj. Situaci přehledně zobrazuje následující Obr. 52, na kterém jsou zobrazeny hodnoty z oblasti kolem maxima, tedy ze stejného časového výseku, který je zobrazen v Tab. 10.1.



Obr. 52: Průběh zbytkového napětí na přepěťové ochraně PK-2 (vč. 050553), při použitém nabíjecím napětí  $U_{nab} = 2,4$  kV, v časovém rozsahu 3,34-4,14  $\mu$ s.

Z obrázku je vidět, že pro přesné určení amplitudy by bylo potřeba znát průběh mezi zaznamenanou maximální hodnotou a hodnotou další. Pak bychom mohli v místě vodorovné tangenty odečíst skutečnou amplitudu.

V Tab. 10.1. není zachyceno maximum proudového průběhu, který kulminuje mimo zaznamenaný časový úsek. U proudového průběhu není odečet maximální hodnoty z hlediska strmosti průběhu žádným problémem. Zdrojem nejistoty v tomto případě budou spíše náhodné děje, které způsobují oscilaci zaznamenaných hodnot. Situace je zřejmá z následujícího Obr. 53, na kterém je zachycena oblast kolem maxima zaznamenaného proudu při zapojení N-PE (Pro zapojení PE-N, je situace obdobná).

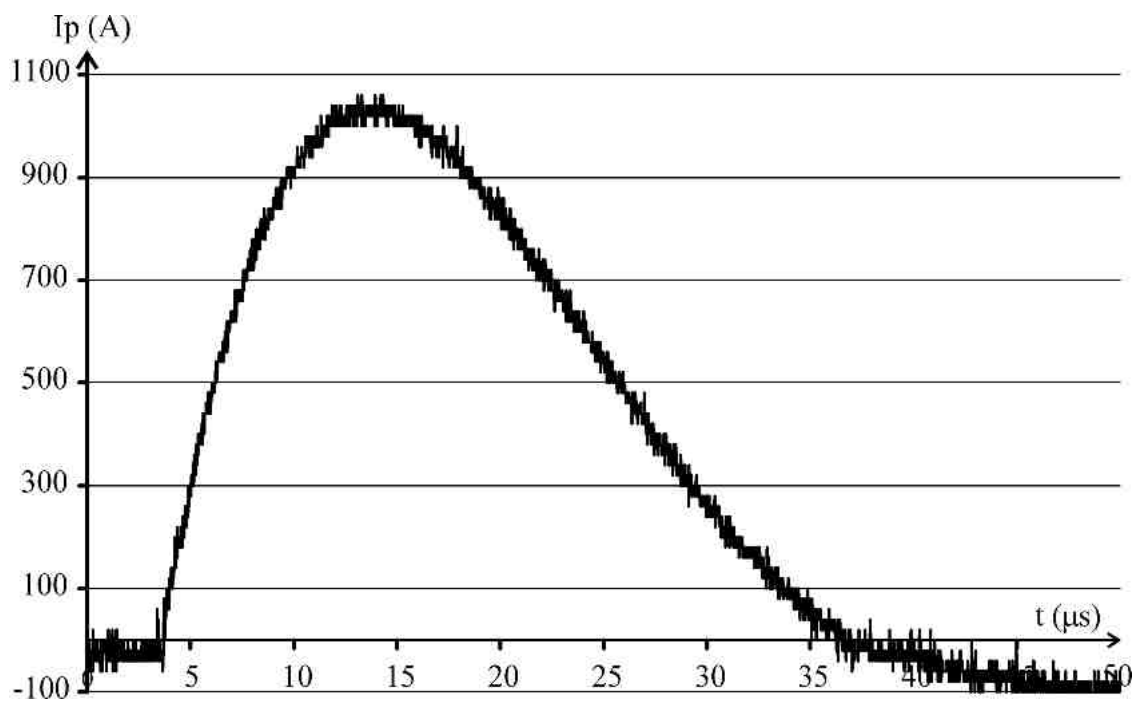


Obr. 53: Průběh proudu na přepětové ochraně PK-2 (vč. 050553), při použitém nabíjecím napětí  $U_{nab} = 2,4 \text{ kV}$ , v časovém rozsahu 10-18  $\mu\text{s}$ .

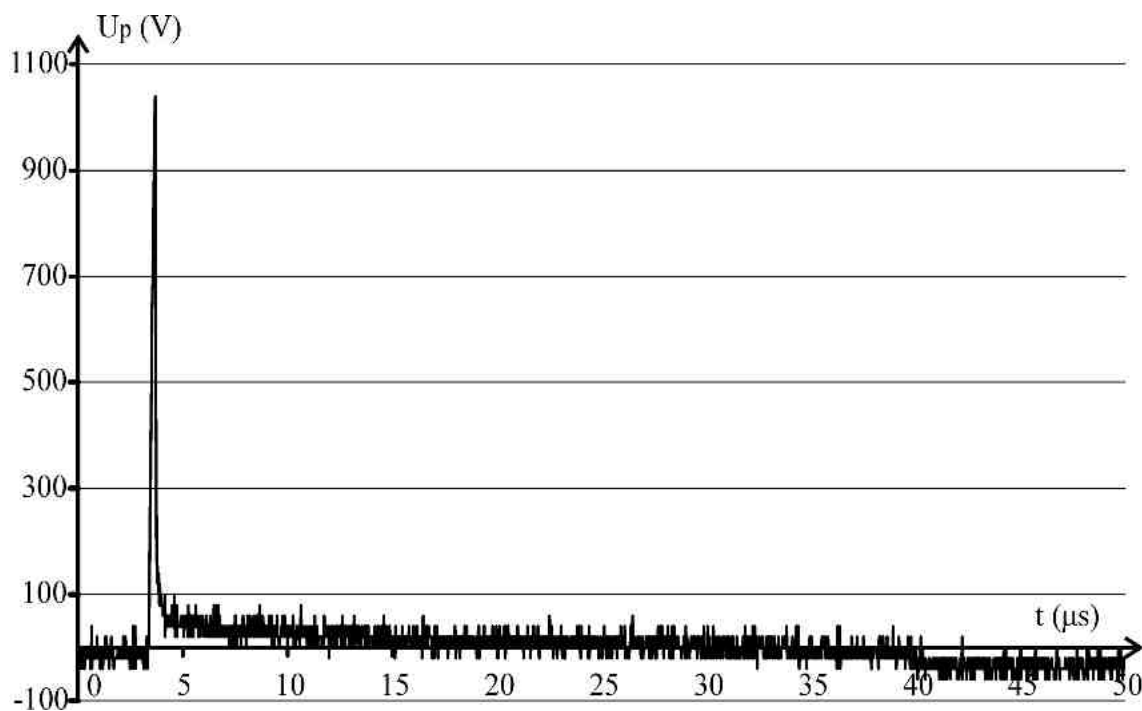
Zatímco u napětového průběhu se rozsah hodnot kolem maxima  $\pm 5 \%$  vešel do časového intervalu menšího než  $0,1 \mu\text{s}$ , tak u proudového rozsahu se stejný relativní nárůst a pokles se rozložil do časového rozmezí cca  $7 \mu\text{s}$ .

Pro celkové posouzení tvaru vlny je potřeba zhodnotit celý průběh vlny. Na následujících Obr. 54 a Obr. 55 je zachycen proudový a napětový průběh pro zapojení NPE pro všechny zaznamenané hodnoty.

Z Obr. 55 vyplývá ještě další důležitá skutečnost, a totiž to, že i v případě napětového průběhu hrají důležitou roli náhodné vlivy. Toto nebylo z Obr. 52 zcela patrné. Takže při určování maximálního zbytkového napětí na přepětové ochraně se neuplatní jen chyba osciloskopu, ale musí být zahrnuta též chyba způsobená náhodnými vlivy.



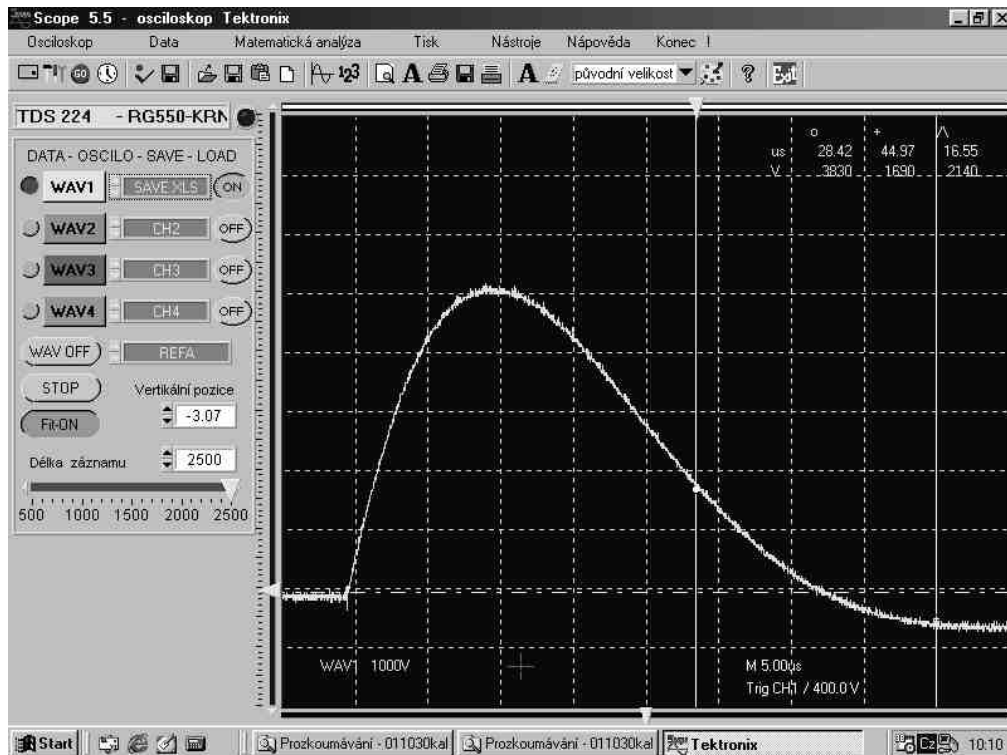
Obr. 54: Průběh proudu na přepětové ochraně PK-2 (vč. 050553), při použitém nabíjecím napětí  $U_{nab} = 2,4 \text{ kV}$  a zapojení N-PE



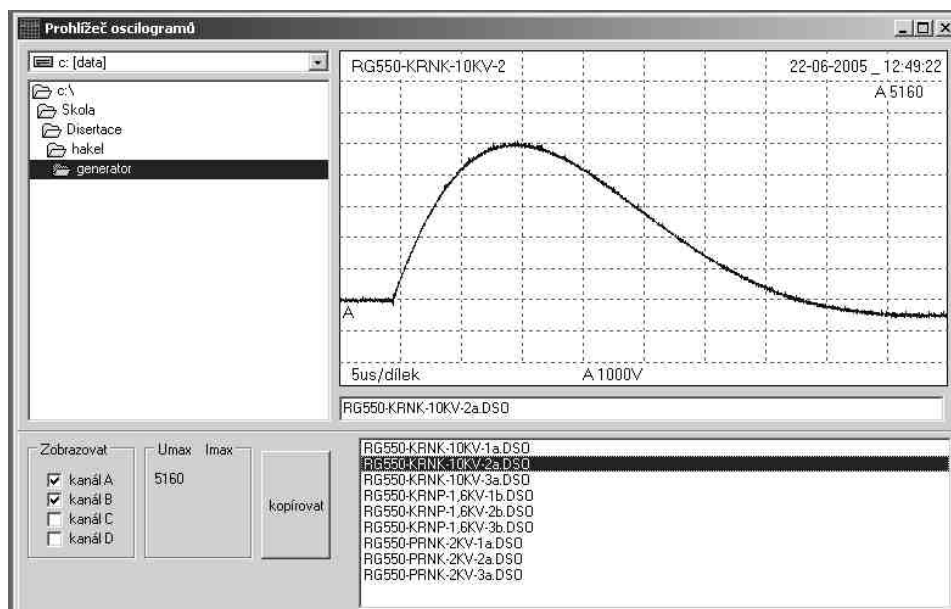
Obr. 55: Průběh zbytkového napětí na přepětové ochraně PK-2 (vč. 050553), při použitém nabíjecím napětí  $U_{nab} = 2,4 \text{ kV}$  a zapojení N-PE

## F. Využití softwaru při vyjadřování výsledku měření přepět'ových ochran

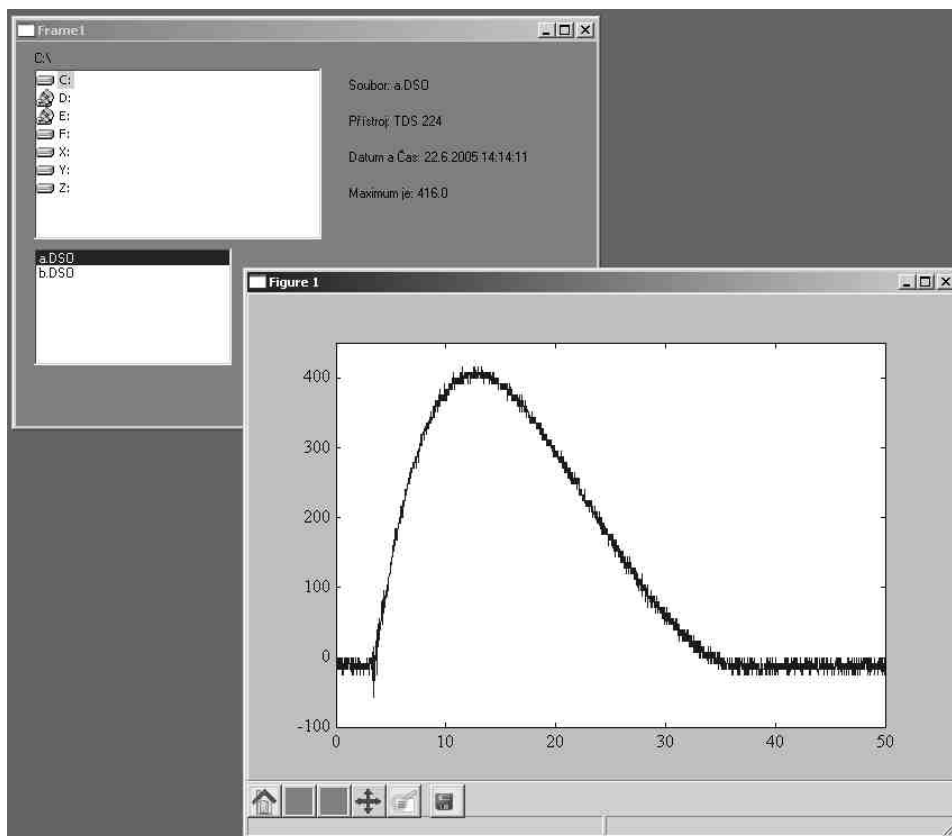
Při práci s hodnotami bylo použito několik jednoduchých programů, které by si zasloužily dále rozvíjet.



Program Scope 5.5 používaný pro záznam průběhů z osciloskopu



Program Prohlížeč oscilogramů (interní SW fy Hakel s.r.o)



*Jednoduchý program na čtení formátu \*.dso vytvořený v Pythonu a wxWidows jako pomůcka ke zpracování praktické části disertační práce*

## **G. Elektronická příloha**

Elektronická příloha obsahuje:

- elektronickou verzi této disertační práce
- kompletní data praktické kapitoly
- zdrojové kódy programu pro čtení formátu \*.dso
- zdrojové kódy v MATLABu
- obrázky v tiskové kvalitě

## H. Odborný životopis

### Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Ing. Petr Frank  
Datum a místo narození: 13. května 1979, Kadaň  
Email: petr.frank.cz@gmail.com  
Telefon: 728 891 425  
Bydliště: Olbrachtovo nám. 8/800, 624 00 Brno-Komín

### Dosažené vzdělání

2002 – dosud **Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, postgraduální studium**

Disertační práce na téma: Metodika zabezpečování optimální přesnosti měření v souladu s metrologickou confirmací.

Absolvované kurzy: Spolehlivost a diagnostika, Statistické metody zpracování dat, Senzorové informační systémy, Aktuální podmínky zkušebnictví a certifikace v ČR a EU, Moderní teorie řízení, Hodnocení bezpečnosti provozu elektrizačních soustav

Povinná zkouška z angličtiny, 2003

Státní doktorská zkouška, 2004

Kombinovaná forma studia - v současné době před obhajobou disertační práce.

1997 – 2002 **Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, magisterské studium**

Obor: Elektrovýroba a management

Typ a rok závěrečné zkoušky: státní závěrečná zkouška z elektrotechnických součástek, analogových obvodů, digitálních obvodů, materiálů v elektrotechnice, výrobních procesů, makroekonomie, mikroekonomie, financí podniku, podnikového managementu a marketingu. Obhájena diplomová práce na téma „Stanovení nejistoty při vyhodnocování vlastností elektrotechnických materiálů“, 2002

1990 – 1997 **Gymnázium, Kadaň**

Typ a rok závěrečné zkoušky: maturita, 1997

### Pracovní historie:

2007 – dosud Inženýr kvality v automobilovém průmyslu. TYCO Electronics s.r.o. Řízení kvality ve výrobě. Zákaznická kvalita.

2005 – 2007 VUT, FEKT, THP, Podíl na laboratorní a teoretické výuce, výpomoc na projektech, administrativa.

2005 Honorovaná přednáška na téma Metrologická confirmace

léto 1995 CHERRY, spol. s r.o., Klášterec nad Ohří, prázdninová praxe, výstupní kontrola mikropínačů

### Kurzy, školení a jiné aktivity:

2008 Česká společnost pro jakost: Interní audit procesu, interní audit výrobku, FMEA.

2005 – 2006 Čtyřsemestrální kurz „Řízení jakosti a metrologie“ VUT FEKT, UVEE Odbor jakosti

2003, 2004, 2005

Studentská soutěž v tvůrčí činnosti EEICT, (3. místo v roce 2004 s prací „Uncertainty in projecting of confirmation system in laboratory testing“)

### **Jazykové znalosti:**

anglický jazyk: pokročilá ústní a středně pokročilá písemná aktivní znalost  
2005/2006 – roční kurz gramatiky a konverzace, pokročilí, JŠ PERFECT ENGLISH  
2004/2005 – roční kurz gramatiky a konverzace, středně pokročilí, JŠ PERFECT ENGLISH  
2003 – zkouška z anglického jazyka pro státní doktorskou zkoušku

německý jazyk: mírně pokročilá pasivní ústní a písemná znalost  
1997 - maturitní zkouška z německého jazyka

ruský jazyk: schopnost číst azbuku

český jazyk: mateřský jazyk

### **Pedagogická činnost:**

2002 – 2007 Vedení teoretických a praktických cvičení kurzů: Elektrotechnika, Řízení jakosti a metrologie, Zajišťování kvality v mezinárodní spolupráci, Nedestruktivní diagnostika a monitorování, Technické požadavky na hodnocení výrobku

### **Zapojení do grantových aktivit:**

Hlavní řešitel grantu Fondu rozvoje vysokých škol č. 1674/2004 „Zavedení konfirmačního systému v laboratoři nedestruktivní diagnostiky“

### **Další znalosti a dovednosti:**

Práce na PC: Pokročilá znalost kancelářských programů (MS Office, OpenOffice), základy programování (Delphi, Python), Matlab, základní práce s grafikou (Photoshop, Corel), orientace v problematice sítí, pokročilá znalost OS MS Windows, základní orientace v OS GNU/Linux.

### **Odborné publikace:**

FRANK, P., SKŘIVÁNEK, J. **Návrh měřicího systému s uvážením vlivu nejistot měření**, TAJ02 Technické aspekty zabezpečování jakosti, VUT v Brně, Brno 2002, s. 48 - 52, ISBN 80-214-2291-2

SKŘIVÁNEK, J., FRANK, P. **Využití Poissonova rozdělení pravděpodobnosti ve statistické přejímce a v procesu řízení jakosti**, TAJ02 Technické aspekty zabezpečování jakosti, VUT v Brně, Brno 2002, s. 78 - 82, ISBN 80-214-2291-2

FRANK, P. **Control Charts in Quality Control - Shewart Charts Application**, Proceedings of 9th Conference and Competition STUDENT EEICT 2003 Volume 3, VUT v Brně, Brno 2003, s. 325 - 329, ISBN 80-214-2379-X

FRANK, P. **Suitability of Different Acceptance Sampling Techniques**, Proceedings of 9th Conference and Competition STUDENT EEICT 2003 Volume 3, VUT v Brně, Brno 2003, s. 330 - 334, ISBN 80-214-2379-X



- HRUŠKA, K., FRANK, P., HRUŠKA, K. **Řízení jakosti a metrologie**, CERM, Brno 2003, ISBN 80-7204-302-1
- HRUŠKA, K., FRANK, P., HRUŠKA, K. **Kontrola jakosti a zkušebnictví**, CERM, Brno 2003, ISBN 80-7204-303-X
- FRANK, P. **Problémy vznikající při vyjadřování nejistoty měření**, sborník příspěvků 34. mezinárodní konference Defektoskopie 2004, Brno 2004, s. 43 - 50, ISBN 80-214-2749-3
- FRANK, P. **Uncertainty in projecting of confirmation system in laboratory trstiny**, Proceedings of 10th Conference and Competition STUDENT EEICT 2004 Volume 3, VUT v Brně, Brno 2004, s. 578 - 582, ISBN 80-214-2636-5
- FRANK, P. **The usability of an approximate method for coverage factor evaluation**, Instrument-making in the XXI Century. Intergation of science, education and industry. Papers of Science-technical konference, Izhevsk: IzhSTU, 2005, s. 170 - 177, ISBN 5-7526-0224-6
- FRANK, P. **Výpočet rozšířené nejistoty a vyjadřování stupňů volnosti standardní nejistoty měření typu B**, Elektrovue, ISSN 1213-1539, 2005, roč. 2005, č. 13, s. 1 - 6.
- FRANK, P. **Coverage factor approximation in expanded uncertainty evaluation**, Proceedings of 11th Conference STUDENT EEICT 2005 Volume 2, VUT v Brně, Brno 2005, s. 87 - 91, ISBN 80-214-2889-9
- FRANK, P. **Způsob výpočtu rozptylu pro nejistoty typu A**, Sborník konference Statistické dny v Brně, VUT v Brně, Brno 2006, s. 23 - 24, ISBN 80-214-3214-4
- HRUŠKA, K., FRANK, P. **Akreditace a zkušebnictví**, Cerm, Brno 2006, ISBN 80-7204-488-5

# I. Curriculum Vitae

## Personal and contact information:

Name: MSc. Petr Frank  
Date and place of Birth: the 13<sup>th</sup> of May 1979, Kadaň  
Email: petr.frank.cz@gmail.com  
Phone: 728 891 425  
Address: Olbrachtovo nám. 8/800, 624 00 Brno-Komín

## Education:

- 2002 – now **Brno university of technology, Faculty of electrical engineering and communication, Doctoral Study Program**  
Dissertation: Providing the optimal accuracy of measurement in accordance with metrological confirmation.  
Passed courses: Reliability and diagnostics, Statistical methods in data processing, Sensor-based information systems, Current requirements for testing and certification in Czech Rep. and EU, Modern Control Theory, State estimation of power systems security  
Compulsory English Exam, 2003  
State doctorate exam, 2004  
External study – before final dissertation defense.
- 1997 – 2002 **Brno university of technology, Faculty of electrical engineering and communication, Master Study Program**  
Program: **Electrical Manufacturing and Management**  
State exam from courses: Electronic devices, Digital circuits and microprocessors, Materials in Electrical Engineering, Production Processes, Macroeconomics, Microeconomics, Company Financial System, Company Management, Marketing. Thesis: "Uncertainty calculation in case of electrotechnical material parameters evaluation", 2002
- 1990 – 1997 Secondary Comprehensive School **Gymnázium Kadaň**  
Graduation, 1997

## Employment history:

- 2007 – now Quality engineer in automotive company TYCO Electronics s.r.o. Quality assurance in production and also customer related quality.
- 2005 – 2007 VUT, FEKT, THP, Assisting in practical and theoretical teaching, Participation in science projects, administration.
- 2005 Salaried lecture "Metrological confirmation"
- summer 1995 CHERRY, spol. s r.o., Klášterec nad Ohří, summer job, Vendor inspection of microswitches

## Other courses and certification:

- 2008 Czech society for Quality: Internal process audits, Internal product audits, FMEA.
- 2005 – 2006 Four-semester course "Quality management and metrology" VUT FEKT, UVVE Division of Quality management
- 2003, 2004, 2005

Conference and Competition Student EEICT, (3<sup>rd</sup> place in year 2004 with work „Uncertainty in projecting of confirmation system in laboratory testing“)

**Languages:**

english: advanced oral and intermediate written (both active)  
2005/2006 – one year course, grammar and conversation, uppermediate, JŠ PERFECT ENGLISH  
2004/2005 – one year course, grammar and conversation, intermediate, JŠ PERFECT ENGLISH  
2003 – english exam as a part of state doctorate exam

german: intermediate oral and written (both passive)  
1997 – High-school graduation

russian: ability to read the Russian alphabet

czech: native

**Teaching:**

2002 – 2007 Course leader in field of: Electrical Engineering, Quality management and metrology, International Cooperation in Quality Assurance, Nondestructive Testing and Monitoring, Technical requirements on production evaluation.

**Scientific activities:**

Leader of the grant of FRVŠ č. 1674/2004 “Confirmation system implementation in nondestructive laboratory”

**Another abilities and skills:**

Computer skills: Knowledge and advanced experience of MS Windows, MS Office, OpenOffice. Basics of programming (Delphi, Python), user knowledge of graphics software (Photoshop, Corel), understanding of computers network, basics user knowledge of GNU/Linux.